

Maik Plenz



Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 5

Potenzialanalyse Überschussstrom für Power-to-Heat und Power-to-Gas

Studie zur Nutzung überschüssigen erneuerbaren Stroms für die Erzeugung von Wärme/Gas in den Regionen Potsdam/Potsdam-Mittelmark und Lausitz-Spreewald



Impressum

Autor:

Maik Plenz, (BTU Cottbus-Senftenberg)

Als Forschungspartner kooperieren

Projektleitung:

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin

www.ioew.de

Kooperationspartner:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU CS)

Postfach 101344, 03013 Cottbus

www.b-tu.de

RWTH Aachen | E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

www.eonerc.rwth-aachen.de

Zitiervorschlag

Maik Plenz (2016): Potenzialanalyse Überschussstrom für Power-to-Heat und Power-to-Gas, Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 5, Senftenberg.

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Gebäude-Energiewende – Systemische Transformation der Wärmeversorgung von Wohngebäuden“. Das Projekt ist Teil des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“ der Sozial-ökologischen Forschung (SÖF; Förderkennzeichen 03EK3521). Für nähere Informationen zum Projekt siehe www.gebaeude-energiewende.de.

GEFÖRDERT VOM



Zusammenfassung

Das Projekt *Gebäude-Energiewende* befasst sich u. a. mit der Frage einer ökologisch-ökonomischen Optimierung der Wärmeversorgung in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie kleineren Mehrfamilienhäusern. Bei den Untersuchungsgebieten handelt es sich um Potsdam / Potsdam-Mittelmark und die Planungsregion Lausitz-Spreewald (Stadt Cottbus, Dahme-Spreewald, Elbe-Elster, Oberspreewald-Lausitz und Spree-Neiße), zwei Untersuchungsregionen mit unterschiedlicher Wachstumsdynamik in Brandenburg. Eine Option zur nachhaltigen Wärmeversorgung stellt der Umstieg auf eine auf erneuerbaren Energieträgern (EE) basierenden Energieversorgung dar. Hierfür ist der Einsatz von EE-Strom mittels Wärmepumpen oder andere Formen von Power-to-Heat sowie der Einsatz von EE-Gas, das mittels Power-to-Gas-Technologien gewonnen wird, prädestiniert. Ziel des vorliegenden Arbeitspapiers ist es zu untersuchen, inwiefern bis zum Jahr 2030 bzw. 2050 in den Untersuchungsregionen voraussichtlich EE-Überschussstrom vorliegt und welche Auswirkungen die Verwendung von Strom für die Wärmebereitstellung auf das Stromsystem haben kann. Es erfolgt zusätzlich eine Analyse der nationalen Entwicklung, um die erhaltenen Ergebnisse einordnen und bewerten zu können.

Die Analyse der Stromüberschussmengen wird unter Verwendung existierender (Meta-)Studien, regionalen Planungsvorgaben oder regionaler Hochrechnungen anhand geplanter Ausbauziele durchgeführt. Die Auswertung zeigt, dass deutschlandweit 10 bis 20 TWh/a (2030) bzw. 20 bis 50 TWh/a (2050) an durch EE-Anlagen erzeugter Überschussenergie zur Verfügung steht. Die Breite des Zielkorridors ist zurückzuführen auf die Erreichungsgrade der Ausbauziele von EE-Anlagen sowie die unklaren wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, speziell durch die CO₂-Abgabe und den fehlenden Markt für Systemdienstleistungen/Flexibilitätsoptionen.

Für die analysierte Region PPM stehen bilanziell keine oder nur geringfügige EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G geeignet wäre. Vereinzelt auftretende minütliche oder stündliche Überspeisungen (meist in der Nacht oder zu Feiertagen) sind von dieser Feststellung ausgenommen.

Für die analysierte Planungsregion Lausitz-Spreewald stehen bereits jetzt bilanziell EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G geeignet wären. Es wird davon ausgegangen, dass diese in den nächsten Jahrzehnten weiter steigen. Die EE-Erzeugungsüberschüsse in der Gesamtregion belaufen sich auf:

- + 450 GWh/a (2013), 1.850-2.350 GWh/a (2030) und 2.850 GWh/a (2050).

Eine weiterführende Betrachtung der Wärmepumpenentwicklung in Deutschland und den Planungsregionen erfolgt auf Basis des potentiellen Strombedarfes dieser Anlagen. Dabei konnte festgestellt werden, dass in Deutschland bis 2030 ca. 7-18 TWh und bis 2050 bis zu 25 TWh/a zusätzlicher Strombedarf durch den Ausbau von Wärmepumpen besteht.

Um eine Abschätzung zur Entwicklung der jeweiligen Untersuchungsregionen geben zu können, wurden die Annahmen aus den Energie- und Klimaschutzkonzepten entnommen. Für die Untersuchungsregion Potsdam / Potsdam-Mittelmark (PPM) wurden elektrische Stromverbräuche für Wärmepumpen von bis zu 75 GWh/a ermittelt (2030). In der Planungsregion Lausitz-Spreewald wird der Anteil des Stromverbrauches von Wärmepumpen für die Jahre 2030 auf 70 bis 100 GWh/a prognostiziert, was ca. 1/20 der EE-Überschussmenge entspricht. Eine Bewertung der Entwicklung bis 2050 kann aufgrund fehlender Daten nicht vorgenommen werden. Der Vergleich mit den voraussichtlich zur Verfügung stehenden EE-Überschussmengen zeigt einerseits, dass diese zur Deckung des zukünftig möglichen Wärmepumpen-Strombedarfes ausreichen. Andererseits wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Flächenerzeugungen und Lastsenken weiter ansteigen wird und ein zusätzlicher Stromtransport durch die prognostizierte Installation von Wärmepumpen erfolgt. Eine sektorübergreifende Durchdringung der Überschussstrommengen muss daher zukünftig fokussiert umgesetzt werden, um die volkswirtschaftlichen und energetischen Verluste zu minimieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Definition	1
2	Technik bei Power-to-Heat und Power-to-Gas	2
2.1	Power-to-Heat	2
2.2	Power-to-Gas	4
3	Überschussstrom und die prognostizierte Entwicklung in Deutschland	7
4	Überschussstrom und die prognostizierte Entwicklung in den Untersuchungsregionen	9
4.1	Landkreis Potsdam-Mittelmark und Stadt Potsdam (PPM).....	10
4.2	Planungsregion Lausitz-Spreewald (LS).....	12
5	Wärmepumpen	14
5.1	Entwicklung des zukünftigen Wärmepumpeneinsatzes in Deutschland	16
5.2	Prognostizierte Be- und Entlastung der elektrischen Netze durch den Einsatz von Wärmepumpen.....	18
6	Fazit und Ausblick.....	19
7	Literaturverzeichnis	21

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Anlagenübersicht Deutschland.....	3
Abb. 2.2: Energetische Nutzung von Wasserstoff in einer reinen Wasserstoffinfrastruktur	6
Abb. 3.1: Entschädigungszahlungen verursacht durch EinsMan-Maßnahmen in Mio. €	7
Abb. 3.2: Bandbreite der prognostizierten Stromüberschüsse (Flexibilitäts- und Speicherbedarf) in Deutschland bis 2050.....	8
Abb. 4.1: Entwicklung des Eigenversorgungsanteils in der Region PPM bis 2050	11
Abb. 4.2: Entwicklung des Eigenversorgungsanteils in der Region LS bis 2050	13
Abb. 5.1: Möglichkeiten der thermischen Nutzung durch Wärmepumpen	15

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Übersicht der möglichen Schritte und ihrer Komponenten einer P2G-H2-Speicherung.....	5
Tab. 2.2: Wirkungsgrade des Gesamtsystems	5
Tab. 4.1: Übersicht der analysierten Szenarien.....	10
Tab. 4.2: Aktuelle und zukünftige EE-Kenndaten in der Region Potsdam und Potsdam-Mittelmark	11
Tab. 4.3: Aktuelle und zukünftige EE-Kenndaten in der Planungsregion Lausitz-Spreewald ...	12
Tab. 4.4: Ausbauprognosen nach [RPL13] im Vergleich mit Tabelle 4.3	14
Tab. 5.1: Nationaler Strombedarf der Wärmepumpen aus den Studien in TWh/a	16

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
CCS	CO ₂ -Abscheidung und –Speicherung, engl. Carbon Dioxid Capture and Storage
COP	Leistungszahl, engl.: Coefficient of performance
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
HTES	Hochtemperatur-Elektrolyse
LS	Planungsregion Lausitz-Spreewald
JAZ	Jahresarbeitszahl
NEP	Netzentwicklungsplan
P2H	Power-to-Heat
P2G	Power-to-Gas
PEM	Membran-Elektrolyse, engl.: polymer electrolyte membrane
PPM	Potsdam/Potsdam-Mittelmarkt
WP	Wärmepumpe

1 Einleitung und Definition

Aufgrund der deutschlandweit steigenden volatilen Stromerzeugung aus alternativen Energiequellen erhöht sich sowohl der Bedarf an Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen (z. B.: Abregelungsmaßnahmen nach §13 Abs. 2 EEG) als auch an hochflexiblen Kraftwerken, um entstehende Wirkleistungsschwankungen zu minimieren. Ein kontinuierlicher und ohne zeitlichen Verzug eintretender Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch ist für die Stabilität des Stromnetzes unabdingbar. Als eine theoretische Option zur Unterstützung des Wirkleistungsausgleiches dient die Umwandlung überschüssiger Energie (vorzugsweise aus EE-Anlagen) in elektrische Wärme bzw. thermische Last (Power-to-Heat, Wärmepumpen) oder andere Energieträger (Power-to-Gas).

Da die Begrifflichkeit Power-to-Heat (kurz: P2H oder PtH) nicht eindeutig definiert ist, werden folgend einige Definitionsvorschläge angeführt.

„Als Power-to-Heat (PtH) wird die Umwandlung von Strom in Wärme verstanden. Für die Definition des Begriffes [...] ist es jedoch wesentlich, dass es sich dabei um ein bivalentes oder hybrides System einer Heizanlage handelt. [...] Es handelt sich bei PtH also um einen zusätzlichen (Überschuss-) Stromverbraucher und nicht um das Lastmanagement eines bestehenden oder neuen Verbrauchers.“ (nach [AGR14])

„In der öffentlichen Fachdiskussion gibt es keine genaue und allgemein verwendete Definition des Terminus P2H. In den meisten Literaturangaben überwiegt allerdings die Meinung, dass man von P2H spricht, wenn Stromüberschüsse aus EE für die Erzeugung von Wärme herangezogen werden.“ (nach [ELL15])

„Unter Power to Heat wird die Nutzung von Strom zur Bereitstellung von Wärme und Kälte verstanden, um Strom, der zu sehr günstigen Preisen angeboten wird, und/oder aus regenerativen Energiequellen, der wegen Netzrestriktionen nicht aufgenommen werden kann, wirtschaftlich zu verwerten, sowie um Netzdienstleistungen für die Stabilität des Stromversorgungssystems bereitzustellen.“ (nach [THA16])

Resultierend aus diesen Definitionen wird P2H in dieser Arbeit, als Nutzung überschüssiger, aus alternativen Erzeugungsanlagen gewandelter Wirkleistung, über einen definierten Zeitraum, zur Umwandlung in thermischer Energie auf Basis eines hybriden/bivalenten Heizanlagen-systems, verstanden.

Ein zusätzlicher Fokus dieser Arbeit liegt auf Power-to-Gas, das als Verfahren mittels einer elektro-chemischen Umwandlung ebenfalls überschüssige elektrische Wirkleistung über mittlere bis lange Zeiträume ein-/aus speichern kann. Die Definition von P2G gilt nach [BNA11] als einheitlich:

„Der Begriff Power-to-Gas steht für ein Konzept, bei dem überschüssiger Strom dazu verwendet wird, per Wasserelektrolyse Wasserstoff zu produzieren und bei Bedarf in einem zweiten Schritt unter Verwendung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in synthetisches Methan umzuwandeln. Als Speicher [...] könnte die bestehende Erdgasinfrastruktur, also das Gasnetz mit den angeschlossenen Untertagespeichern, verwendet werden.“

Neben einer definitorischen Einordnung der Techniken wird in den Folgekapiteln auch eine technische Status-quo Zustandsbewertung gegeben.

Das Ziel des vorliegenden Arbeitspapiers ist es, neben einer nationalen Abschätzung eine regionale Analyse (in den Untersuchungsregionen Lausitz-Spreewald und Potsdam-Mittelmark) zur Entwicklung der aus EE-Anlagen erzeugten Strommengen zu erstellen. Dabei werden auf Ausbauszenarien basierende Prognoseabschätzungen von EE-Überschusspotenzialen durchgeführt und die resultierenden Auswirkungen großflächiger Energieform-/trägerumwandlungen für die Jahre 2030 und 2050 aufgezeigt. Gleichzeitig wird ein Einblick in die zukünftige Entwicklung und Auswirkung des großflächigen Einsatzes von Wärmepumpen und P2H / P2G in den Regionen und Deutschland gegeben, um deren Wirkung auf eine mögliche Steuerung des Überschussstromes zu werten.

2 Technik bei Power-to-Heat und Power-to-Gas

2.1 Power-to-Heat

Weil die existierenden Optionen zur stromseitigen Flexibilisierung technisch eingegrenzt sind, wird seit langem an einer großflächigen Umwandlung von elektrischer Leistung zu thermischer Energie gearbeitet. Die Idee beruht darauf, umgewandelten, überschüssigen Wind- und Solarstrom in anderen Energieformen unterschiedlichen Bereichen, z. B.: der Wärmeversorgung, der Industrie oder der Mobilität, verfügbar zu machen. Wie bereits in der Einleitung angeführt, beschreibt die Technologie Power-to-Heat (P2H) nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ein thermisches Wandlungsverfahren, bei dem Stromüberschüsse zur Wärmeerzeugung verwendet werden [ELL15]. Eine Sektorenkopplung zwischen dem Strom- und Wärmesystem über die Technologie P2H ermöglicht einerseits eine sinnvolle Anwendung für mittel- bis langfristig auftretende Wirkleistungsüberschüsse und andererseits eine stärkere Nutzung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich.

Das Funktionsprinzip ist dabei einfach zu beschreiben. Wenn stromseitig negative Residuallasten durch ÜberSpeisung von EE-Anlagen auftreten, können diese Überschüsse zur Deckung des Wärmeverbrauchs oder zur Speicherung in Wärmespeichern mittels P2H umgewandelt werden. Ein Potenzial für P2H besteht, ausgehend von der Stromangebotsseite, daher nur beim Eintreten folgender Zustände:

- + Regionale Netzengpässe bei Residuallast > 0 + Must-Run-Leistung
Überschüssiger Strom, der aufgrund ausgelasteter oder zu niedrig dimensionierter Übertragungs-/Verteilnetze nicht mehr abtransportiert werden kann, muss u.U. regional verwertet werden. Ein Weiterbetrieb von konventionellen Kraftwerken ist dabei ebenfalls erforderlich.
- + Residuallast < 0 + Must-Run-Leistung
Bei 100% Deckung des Strombedarfes durch EE müssen weiterhin konventionelle Kraftwerke am Stromnetz bleiben, um die Systemstabilität (Schwarzstart- und Redispatchfähigkeit, regionaler Spannungs- und Frequenzhaltung durch Blindleistungsregelung, Bereitstellung von Kurzschlussleistung sowie der Einhaltung und Regelung der Systembilanz) gewährleisten zu können. Entstehende Überschussmengen müssen abgebaut werden.

Den beiden Erzeugungsvoraussetzungen sind gleichfalls mehrere Abnahmekriterien gegenübergestellt. P2H kann beispielsweise nur dann genutzt werden, wenn ein Bedarf an Wärme besteht oder ausreichende Wärmespeicherkapazitäten vorhanden sind [ELL15]. Eine aktuelle Übersicht der Anlagen in Deutschland verdeutlicht das bereits bestehende elektrische Potenzial dieser Technik (siehe Abb. 2.1). Die in der Übersichtskarte verorteten 25 Anlagen besitzen eine mittlere elektrische Leistung (\bar{x}_{25}) von 12 MW, in Summe ($\sum x_{25}$) 296 MW. Die Anlagengröße variiert zwischen $x_{\min} = 0,6$ MW und $x_{\max} = 50$ MW.



Abb. 2.1: Anlagenübersicht Deutschland, angelehnt an [KÜH16]

Die Möglichkeiten zur Umwandlung elektrischer Wirkleistung in Wärme sind technisch vielfältig umsetzbar. Die Grundlage bilden zwei unterschiedliche Varianten:

- + eine direkte Umwandlung über einen elektrischen Heizstab oder
- + die Umwandlung über eine elektrische Wärmepumpe (siehe Kapitel 5).

Beide Varianten dienen zur Anwendung in großtechnischen Maßstäben (z. B.: Industrie oder Fernwärmenetze) und im Haushalts- bzw. GHD-Bereich (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen), wobei die Nutzung von Widerstands- oder Elektroden-Heisswasserkesseln zur Wärmeerzeugung dominiert.

In einem Widerstands-Heisswasserkessel dient ein Heizwiderstand als Bauteil einer Widerstandsheizung. Dies kann in seiner einfachsten Ausführung ein niederohmiger Draht oder auch Heizleiter sein, der als leitfähiges Material aufgrund des niedrigen elektrischen Widerstands von Strom durchflossen und erhitzt wird. Abhängig vom Widerstandswert (nach dem Ohmschen Gesetz) entwickelt sich die Abgabeleistung der Wärme. Der Stromfluss darf dabei die Schmelztemperatur des Leitermaterials oder die Grenztemperatur des Isolierträgers nicht übersteigen.

Der Elektrodenkessel-Heisswasserkessel dient zur Erzeugung von Warmwasser, Heißwasser (bis zu 100 °C) oder Dampf (bis zu 240 °C) direkt aus elektrischer Energie [AHK14]. Charakteristisch ist, dass er mit Wechselstrom (3-36 kV bei einer Leistung von 0,5 – 90 MW) betrieben wird und der Strom direkt ohne Widerstandselemente im Elektrodenkessel, in das Wasser, mittels (zumeist) dreier Elektroden, eingebracht wird (ähnlich einem Tauchsieder). Elektrodenkessel stellen neben den deutlich effizienteren, aber in der Installation auch teureren Wärmepumpen, eine Möglichkeit zur Realisierung von Power-to-Heat-Anlagen sowohl in Nah- als auch Fernwärmenetzen dar.

Das Verfahren ähnelt allgemein dem Vorgang der Elektrolyse. Es werden unter Spannung stehende Elektroden direkt in Kontakt mit dem Wasser gebracht, um eine rein elektrische Widerstandsbeheizung des Wassers zu ermöglichen. Diese werden jedoch nicht mit Gleich-, sondern mit Wechselspannung beaufschlagt, um die elektrolytische Zerlegung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff zu verhindern. Die Regelung der Anlage

kann durch Zugabe von leitfähigkeitserhöhenden Substanzen wie Salze und Zugabe von entsalztem Wasser erfolgen, um die Leistung langsam und nach Bedarf zu reduzieren.

Im Niedertemperaturbereich bzw. auf dezentraler Ebene kann das P2H-Verfahren durch:

- + Heizstäbe,
- + Heizpatronen,
- + Wärmenetzgebundene Großwärmepumpen,
- + Wärmepumpen (siehe Kapitel 5: Luft-Luft, Luft-Wasser, Erdwärme),
- + Durchlauferhitzer oder
- + Nachtspeicheröfen eingesetzt werden.

Im Bereich der (wärme-)netzgebundenen Großwärmepumpen gibt es aktuell besonders in Dänemark eine Vielzahl von Einsätzen in Quartieren oder abgegrenzten Bereichen. Dänemark besitzt mit einem Windkraftanteil von über 30 %, viermal mehr volatile Erzeugungsleistung als Deutschland. Weiterhin existiert in Dänemark eine hohe Vernetzung der Gebiete mit Fern- und Nahwärmesystem, was die Nutzung überschüssiger Windenergie besonders wertig macht [DEA12]. Bei entsprechender Absenkung der Vorlauftemperaturen in den Wärmenetzen lassen sich insbesondere mit Großwärmepumpen deutliche Effizienzsteigerungen erreichen, welche für die langfristige erfolgreiche Transformation der Energieversorgung notwendig sind [AGR14].

2.2 Power-to-Gas

Ähnlich P2H gilt Power-to-Gas (auch P2G oder PtG) als Flexibilitäts- und Stabilitätsoption die sowohl die Systemintegration Erneuerbarer Energien, die Möglichkeit zur Erbringung von systemdienlichen Leistungen als auch die Erreichung von Emissionsminderungen im Industrie-, Gebäude- und Verkehrsbereich erbringen kann. Dadurch werden bereits heute die teilweise überlasteten Stromverteilnetze entlastet, z. B.: durch die WindGas-Anlage Falkenhagen. E.ON betreibt dort seit 2012, in der brandenburgischen Peripherie mit hoher dezentraler EE-Einspeisung, eine Demonstrationsanlage zur Umwandlung von EE-Energie in Wasserstoff und Einspeisung in das Gasnetz [DEA16]. Die Risiken für den sicheren, technischen Betrieb der Netze können somit reduziert und volkswirtschaftliche Zusatzkosten durch die Abregelung und Kompensation des regenerativ erzeugten Stroms vermieden werden. Weiterhin dient die Anlage zur Reduzierung des Ausbaubedarfes in übergelagerten Netzen.

Der P2G-Prozess ermöglicht eine quantitativ relevante Speicherung von Energie über lange Zeiträume und gleichzeitig eine Rückwandlung in elektrische Energie. Diese Speicherform wird deutschlandweit in ca. 20 verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten erprobt. Bei allen Testanlagen stehen die Demonstration der technischen Machbarkeit, die Erreichung der Standardisierung und Normierung, die Reduktion der Kosten und die Erprobung von Geschäftsmodellen im Mittelpunkt.

Grundsätzlich ist zwischen den Speichermedien Wasserstoff H_2 und Methan CH_4 , also zwischen zwei verschiedenen P2G-Konzepten zu unterscheiden. Wasserstoff ist aufgrund seiner Eigenschaften ein günstiges Speichermedium mit einer Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere im Mobilitätssektor. Eine weiterführende Methanisierung gilt als langfristige Option für die saisonale Speicherung größerer Energieüberschüsse. Unterschiede sind hauptsächlich in der Verwendung der Speicher- und Ausspeichertechnologien sowie der optionalen Stufe der Methanisierung und deren Komponenten zu finden (siehe Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Übersicht der möglichen Schritte und ihrer Komponenten einer P2G-H₂-Speicherung (angelehnt an [STE14])

Einspeichern	Speicher	Ausspeichern
Technologien	Arten	Technologien
Alkalische Elektrolyse (AEL)	Gasnetz	Brennstoffzelle
Membran-Elektrolyse (PEM)	Kavernenspeicher	Gasturbine, GuD-Kraftwerk, BHWK
Hochtemperatur-Elektrolyse (HTES)	Gas-Öl-Lagerstätten Oberirdische Speicher	Gasheizung, Gaswärmepumpe, Kältemaschinen Brennstoffzellenfahrzeug, Raketenantrieb Stoffliche Nutzung

Sowohl die Power-to-Gas-Wasserstoff-Speichersysteme als auch die Power-to-Gas-Methan-Speichersysteme unterscheiden sich innerhalb ihrer Anwendungen und Zielstellung. Bei P2G-H₂ Systemen wird danach unterschieden wie die Nutzung des Wasserstoffs im Anschluss an die Elektrolyse erfolgt (stoffliche oder energetische Nutzung). Im Power-to-Gas-Methan (P2G-CH₄) – Speichersystem erfolgt nach der Elektrolyse mit der Methanisierung ein Veredelungsschritt.

Der generierte Wasserstoff wird mittels chemischer oder biologischer Vorgänge mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) zusammengebracht und in die Produkte Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) gewandelt. Das Endprodukt bezeichnet man dann als synthetisches Erdgas oder SNG (englische Abkürzung für „Synthetic Natural Gas“ bzw. „Substitute Natural Gas“). Die Vorteile dieser Veredelung sind u. a. in der höheren Energiedichte und den Auswirkungen auf die Lagerung, im Transport (geringe Diffusion) und der endgültigen Nutzung zu finden [BNA11]. Als Nachteil wird der z. Z. noch niedrige Wirkungsgrad der Einzel- und Gesamtprozesse angesehen (siehe Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Wirkungsgrade des Gesamtsystems (nach [MIC15])

Gesamtwirkungsgrad in %	Heute	2025	2050
Ohne Rückverstromung:			
AEL-Speicherung-Methanisierung	46-53	53-55	67
Mit Rückverstromung:			
AEL-Speicherung-Methanisierung-GuD-Kraftwerk	27-32	32-33	40
Mit Rückverstromung:			
AEL-Speicherung-Methanisierung-Gasturbine	18-21	21-22	27

Der Unterschied zwischen einzelnen P2G – CH₄ – Konzepten ist im Ursprung des Kohlenstoffdioxids begründet, bzw. in der Einbindung der CO₂-Quelle in die Methanisierung. Mögliche Quellen nach [STE14] sind beispielsweise:

- + CCS (engl. Carbon Dioxid Capture and Storage; dt. CO₂-Abscheidung und -Speicherung),
- + Biogas- oder Kläranlagen,
- + CO₂ aus Luft oder Industrieprozessen Luft (siehe Abb. 2.2),
- + oder konventionelle Kraftwerke

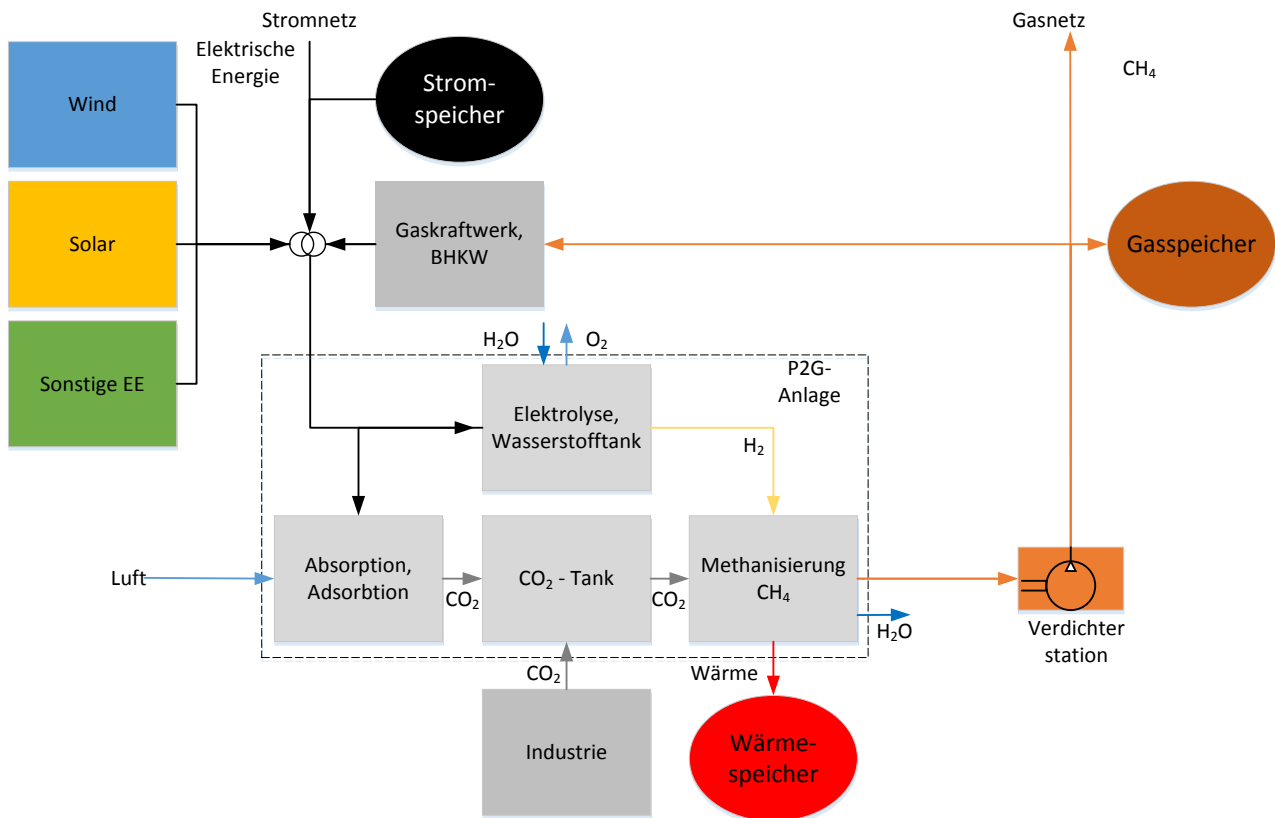


Abb. 2.2: Energetische Nutzung von Wasserstoff in einer reinen Wasserstoffinfrastruktur, angelehnt an [STE14]

Eine komplette Übersicht aller CO₂-Quellen und ihrer Wirkung auf die Wasserstoffinfrastrukturen finden sich u. a. in [STE14]. Aufgrund der Nutzung vorhandener Infrastruktur und der Möglichkeit der Substitution von konventionellen Energieträgern in Verkehr, Strom und Wärme besitzen die P2G-Konzepte zukünftig die größten Potenziale eines langfristigen Speichersystems für überschüssige Energiemengen.

3 Überschussstrom und die prognostizierte Entwicklung in Deutschland

Als ein Hauptproblem der Energiewende wird die steigende Einspeisung von Erneuerbaren Energien und ihrer volatilen Leistungsspitzen bzw. negativer Residuallast, z. B. in Starkwindphasen angesehen. Wenn diese meteorologischen Bedingungen mit starken Leistungsgradienten auf schwache Lasten treffen (beispielsweise an Wochenenden oder Feiertagen), liegt eine potentielle Gefahr für die Netzstabilität vor.

Aus diesem Grund haben die Netzbetreiber seit 2009 die Möglichkeit nach §13.2 mit §§14, 15 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die Einspeisung von EE-Anlagen in solchen Situationen bei Überlastung der Netzkapazität ein- bis abzuregeln (Einspeisemanagement, kurz EinsMan). Diese Ein-/Abregelung wird den Anlagenbetreiber nach §15.1 EEG entsprechend entschädigt und über die Netznutzungsentgelte auf die Verbraucher umgelegt.

Der Monitoringbericht 2015 [BNA15] der Bundesnetzagentur zeigt, dass sich im Vergleich zum Jahr 2013 (555 GWh/a) die Menge der Ausfallarbeit verursacht durch EinsMan-Maßnahmen mit 1.581 GWh/a (2014) annähernd verdreifacht hat (beispielhaft Entschädigungszahlung in Abb. 3.1). Der Anteil der durch EinsMan-Maßnahmen entstandenen Ausfallarbeit im Jahr 2014, bezogen auf die gesamte Nettostromerzeugungsmenge aus EEG-vergütungsfähigen Erzeugungsanlagen (auch Direktvermarktung), beläuft sich auf 1,16 % (2013: 0,44 %t). Für das Jahr 2015 zeichnet sich eine weitere Steigerung der Ausfallarbeit und ein Anstieg der Entschädigungszahlungen auf ca. 320 Mio. € ab. Das Verhältnis von Übertragungs- (ÜN) zu Verteilnetz (VN) bei Ausfallarbeit (4 % ÜN / 96 % VN) und der Entschädigungszahlungen (31 % ÜN / 69 % VN) verdeutlicht, wo die EE-Anlagen hauptsächlich installiert sind und welche der in Kapitel 2.1 genannten Netzengpässe (- Regionale Netzengpässe bei Residuallast > 0 + Must-Run-Leistung) vorliegen.

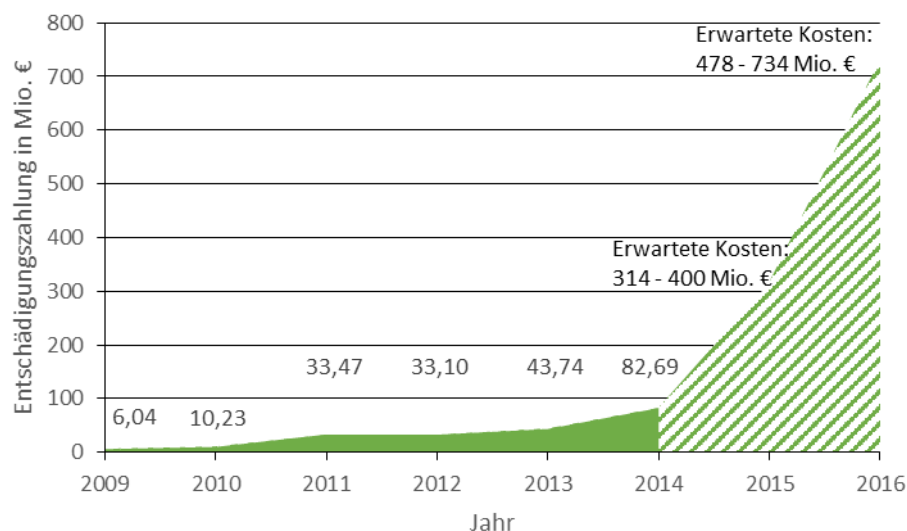


Abb. 3.1: Entschädigungszahlungen verursacht durch EinsMan-Maßnahmen in Mio. € (Quelle: [BNA15] und [BNA16a])

Auch für das Jahr 2016 ist mit einem weiteren, deutlichen Anstieg der Einsparmaßnahmen zu rechnen. Bei gleichzeitig steigendem Zubau Erneuerbarer Energien (z. B.: nach dem im Netzentwicklungsplan Strom genannten Szenario B) wird es ohne Gegensteuerung zu einer kontinuierlichen Zunahme dieser Maßnahmen bzw. kritischer Netzsituationen kommen [NEP16].

Das realistische Szenario B 2030 des Netzentwicklungsplanes [NEP16] (siehe Tab. 4.1 in Kapitel 4) ist allgemein durch eine höhere Ausbaudynamik gekennzeichnet, welche sich stärker an den Korridoren für den jährlichen Zubau gemäß § 3 EEG orientiert. Es wird von einem vergleichsweise starken Zubau an Windenergieleistung Onshore ausgegangen, der Zubau an PV-Anlagen schwächt sich nach dem Erreichen des atmenden Förderdeckels von 52 GW ab. Der Zubau der sonstigen EE-Typen verläuft eher moderat oder stagniert. Der daraus resultierende, prognostizierte EE-Anteil am Bruttostromverbrauch liegt für das Jahr 2030 bei 56 %, woraus zusätzlich entstehende Kapazität an Überschussenergie bzw. negativer Residuallast von bis zu 7,5 TWh/a entweder abgeregelt, verkauft oder gespeichert werden müssen [Sch14].

Diese Residuallast unterteilt sich in ihrer Häufigkeitsverteilung der zusammenhängenden Überschussenergie relativ stark auf Überschussphasen in einer Größenordnung bis zu 40 GWh. Dies gilt für eine angenommene gleichbleibende Referenzlast, wenig Must-Run-Kapazitäten und relativ flexibler Biomasseverstromung [SCH14]. Erst diese Phasen (ca. 40 zusammenhängende Überschussperioden mit bis zu 40 GWh p.a.) sowie die geringere Anzahl von Phasen noch größerer zusammenhängender Überschussperioden (ca. 30 Phasen p.a. für >40 bis > 300 GWh) eignen sich aufgrund der technischen Voraussetzungen für die Umwandlung von Strom zu Wärme/Gas [BMU12].

Andere Quellen und Metaanalysen [STE14] bewerten die produzierte Überschussenergie ebenfalls in vergleichbaren Umfängen, wobei ein Mittel über alle Studien von 10 TWh/a (2030) bis 18 TWh/a (2050) erreicht wird. Diese aus Abb. 3.2 zu entnehmende Schwankungsbreite, ist primär zurückzuführen auf die Erreichung der Ausbauziele von EE-Anlagen sowie die Entwicklung der Nachfrage und den regulatorischen Rahmenbedingungen (CO₂-Abgabe, Markt für Systemdienstleistungen/Flexibilitätsoptionen).

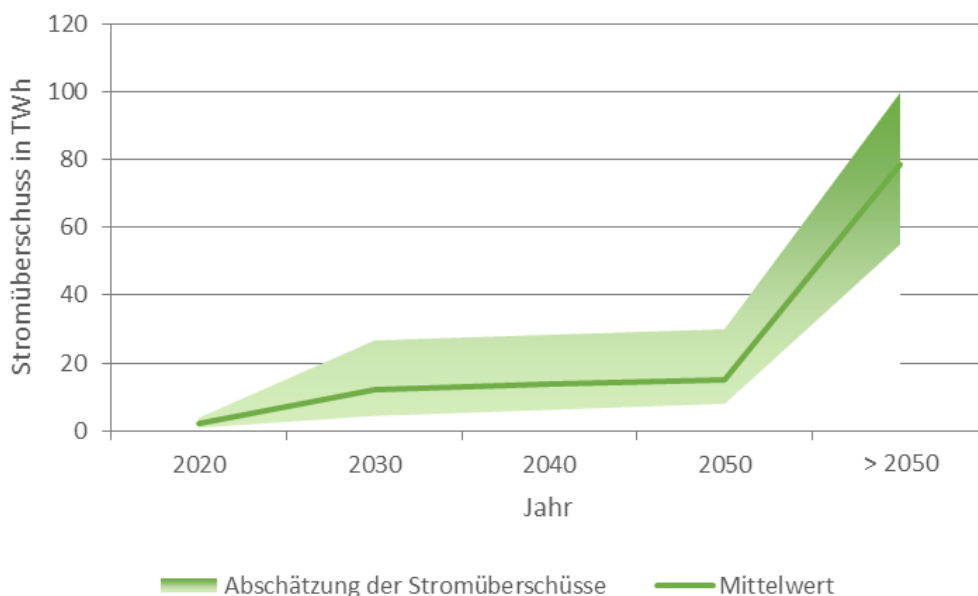


Abb. 3.2: Bandbreite der prognostizierten Stromüberschüsse (Flexibilitäts- und Speicherbedarf) in Deutschland bis 2050, angelehnt an [STE14]

Weitere aktuelle Studien weisen für das Jahr 2030 bzw. 2050 ebenfalls hohe Überschussmengen, vergleichbar mit der in Abb. 3.2 befindlichen oberen Grenze auf. Nach [DLR14] kann es zu einer Überschussmenge

von bis zu 23 TWh/a in 2030 und 47 TWh/a in 2050 kommen. Damit können die angenommenen Mittelwerte, als eine zurückhaltende Schätzgröße eingeordnet werden.

Diese massenhafte Abregelung von regenerativ erzeugtem Strom in Überschussituationen ist volkswirtschaftlich ineffizient. Neben den genannten Netznutzungsentgelten (durch EinsMan, Netzausbau, Redispatch) verursacht der gleichzeitige, zentrale und dezentrale Einsatz fossiler Energieträger in der Wärmeversorgung ebenfalls Kosten.

4 Überschussstrom und die prognostizierte Entwicklung in den Untersuchungsregionen

Die nachfolgenden Projektionen zur Entwicklung des Überschussstromes in den Untersuchungsregionen Potsdam / Potsdam-Mittelmark und Planungsregion Lausitz-Spreewald laufen unter einer Vielzahl von Annahmen. Diese Annahmen ermöglichen eine auf externen Szenarien beruhende Schätzung der Entwicklung der Anlagenzahlen, Leistungen und Erzeugungskapazitäten im Bereich der Erneuerbaren Energien. Folgende Annahmen werden getroffen:

- + Der prognostizierte Ausbau der EE-Anlagen in den Regionen stimmt mit den Szenarien der Bundesregierung überein
- + Zu diesen untersuchten EE-Szenarien für Gesamtdeutschland zählen:
 - + EEG 2016 sowie
 - + NEP 2017 - 2030 Szenario A, B und C.
 - + Die Projektion für 2050 erfolgt auf Basis des [ZSW14] – Szenarios.
- + Die Auswahl dieser Szenarien beruht auf der Abschätzung bisheriger Untersuchungen zu der Erreichbarkeit der Ausbauziele [SCH15].
- + Die Abschätzung der nationalen Ausbauszenarien wird anhand definierter Merkmale skaliert und zur Ermittlung des Zubaus der regionalen Kapazitäten verwendet. Hierbei erfolgt eine Reduktion um Wind Offshore, da dies in den Untersuchungsregionen nicht auftritt.
- + Um die Produktionsleistung (und damit die Überschussstrommenge) zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass die mittleren Volllaststunden der Anlagentypen gleich bleiben (bezogen auf die Volllaststunden 2013).
- + Es wird angenommen, dass die Produktion bilanziell erzeugt und in einem vollständigen Betrachtungsjahr genutzt wird sowie ein direkter Stromfluss innerhalb der Regionsgrenzen besteht.
- + Die Projektion untersucht nur die Entwicklung der EE-Anlagen, weitere Erzeugereinheiten werden nicht betrachtet. Dies wird begründet mit den in der Definition von P2H vorgegebenen EE-Überschussmengen.
- + Der Energieverbrauch bleibt einigermaßen konstant (kaum Reduktion erwartet, u. a. aufgrund von Rebound-Effekten, erhöhten Bedarf durch Elektro-Mobilität oder Wärmepumpen) oder wird spezifisch aus den regionalen Studien entnommen [RPG13].

Tab. 4.1: Übersicht der analysierten Szenarien

Netzentwicklungsplan 2017-2030 [BNA16]			EEG 2016 [EEG16]	
Szenario A	Szenario B	Szenario C	Ausbauziele [EEG14]	nach
Unterer Rand Ausbauziele	Mittlere Annahmen zum Ausbau und der Ge- schwindigkeit	Oberhalb politischer Ausbauziele, speziell Wind onshore	Gesetzliche Vorgaben für EE-Zubauwerte und De- ckelungen	
49 % EE-Versorgung in 2030	51% EE-Versorgung in 2030 (57 % in 2035)	53% EE-Versorgung 2030		
EE-Ziele werden ver- fehlt, Zubau von Stein- kohlekraftwerke	Keine neuen Kohlekraft- werke, dafür Zubau von Gaskraftwerken	Kleiner konventioneller Kraftwerkspark	Keine Berücksichtigung konv. Kraftwerke	

Das Szenario A findet aufgrund der Ziele der Bundesregierung, der Beschlüsse der COP 21 (u. a. 1,5 °C-Ziel) und der geplanten Dekarbonisierung der Wirtschaft keine Berücksichtigung [BNA16]. Als Ergebnis der Annahmen soll eine szenarienbedingte Entwicklung der Gesamterzeugungskapazitäten für jedes Bundesland und die untersuchten Netzgebiete stehen. Neben der Gesamterzeugung wird nach dem im Kapitel 2.1 genannten Fall: *Residuallast < 0 + Must-Run-Leistung*, die EE-Überspeisung analysiert und Überschussmengen ermittelt. Regionale Netzengpässe können im zu betrachtenden Einzelfall aufgrund fehlender Netzdaten nicht analysiert und daher zur Ermittlung der Überschüsse nicht herangezogen werden.

4.1 Landkreis Potsdam-Mittelmark und Stadt Potsdam (PPM)

Im anstehenden Abschnitt wird die Entwicklung des Überschussstromes in den Regionen Stadt Potsdam und Potsdam-Mittelmark untersucht. Für diese beiden Regionen wird ein Verbrauch angenommen, der sich wie folgt aufteilt:

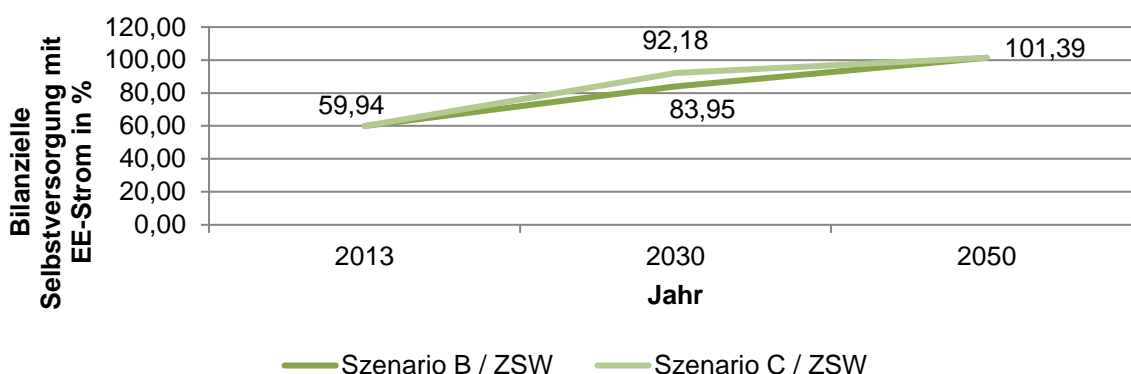
- + Stadt Potsdam: 467 GWh/a (nach [POT10], [KNO08])
- + Potsdam-Mittelmark: 811 GWh/a (nach [RPG13], [LPM16])

Gleichzeitig wird die bilanzielle Erzeugung des Stromes aus EE-Anlagen analysiert und für die Jahre 2030 und 2050 fortgeschrieben. Für das Jahr 2030 stehen die Szenarien B und C des Szenariorahmens 2030 [BNA16] sowie die gesetzlichen Vorgaben nach [EEG16] zur Verfügung, die in der Tabelle 4 dargestellt werden.

Tab. 4.2: Aktuelle und zukünftige EE-Kenndaten in der Region Potsdam und Potsdam-Mittelmark

Art	Leistung 2013 in MW _p	Produktion 2013 in GWh/a	Produktion 2030 in GWh/a	Produktion 2050 in GWh/a
Solar	222	199,6	337-390	414
Wind	289	437	620-659	761
Wasser	0,1	0,2	0,2	0,2
Biomasse	22	120	106-120	111
Klärgas	2,7	9,3	9,3	9,3

Aufgrund der o. g. Situation versorgte sich die Untersuchungsregion PPM (Stadt Potsdam und Potsdam-Mittelmark) im Jahr 2013 bilanziell mit 59,94 % aus EE-Anlagen stammenden Strom. Es sei nochmals erwähnt, dass hierfür angenommen wird, dass die Produktion bilanziell vollständig in einem Betrachtungsjahr genutzt werden kann sowie ein Stromfluss allein innerhalb der Regionsgrenzen besteht. Insbesondere das Lastzentrum Potsdam stellt dabei den Hauptabnehmer des im Umland erzeugten EE-Stromes dar. Die angefügte Grafik (siehe Abb. 4.1) verdeutlicht die Veränderung des Eigenversorgungsanteils mit EE-Anlagen bis 2050.

**Abb. 4.1: Entwicklung des Eigenversorgungsanteils in der Region PPM bis 2050**

Für die untersuchte Region PPM stehen bilanziell keine oder nur geringfügige EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G (nach den in Kapitel 2 genannten Bedingungen) geeignet wäre. Vereinzelt auftretende minütliche oder stündliche Überspeisungen (meist in der Nacht oder zu Feiertagen) sind von dieser Feststellung ausgenommen. Eine Eignung für eine Umwandlung dieser Überschüsse wäre separat zu prüfen.

Eine alleinige Betrachtung der Region Potsdam-Mittelmark ohne die Lastsenke Potsdam prognostiziert einen Eigenversorgungsanteil mit EE-Kapazitäten von 130-143 % (2030) sowie 158 % für das Jahr 2050, was zur Wandlung der Wirkleistungsüberschüsse ausreicht. Die Überschüsse belaufen sich rechnerisch auf:

- + 2030: 262-367 GWh/a (ohne Stadt Potsdam)
- + 2050: 485 GWh/a. (ohne Stadt Potsdam)

Ein Vergleich mit den spezifischen Energie- und Klimaschutzkonzepten der Region Potsdam-Mittelmark (Havelland-Fläming) [RPG13] und der Stadt Potsdam [POT10] soll die Unterschiede der Potenzialabschätzung der Kommunalpolitik zu den o. g. theoretischen Ergebnissen aufzeigen.

Die Stadt Potsdam stellt in ihrem Klimaschutzkonzept 2010 [POT10] mittels eines Solarkatasters das Solar-Potenzial fest und gibt Hinweise auf die mögliche Entwicklung bis 2030 vor. Abweichend von denen für Tab. 4.2 prognostizierten Werten (Energieerzeugung mittels PV-Anlagen: 15.500-18.000 MWh/a) ermittelte die Studie, PV-Stromerträge von 23.800 (2020) bis ca. 115.000 MWh/a (für 2030). Diese deutlichen Abweichungen resultieren einerseits aus der Analyse aller Dachflächenpotenziale, der linearen Fortschreibung der Zubauraten der Jahre 2008 - 2010 sowie einer Darstellung der maximal möglichen Erträge durch die Studie. Die Region Potsdam-Mittelmark ist nur ein Landkreis innerhalb der Region Havelland-Fläming, die ein eigenständiges Energiekonzept erstellt hat [RPG13]. In diesem Energiekonzept wird nicht von Ausbauzielen bis zu einem festgelegten Zeitpunkt, sondern ebenfalls von Potenzialen im Gebiet gesprochen. Eine Vergleichbarkeit mit den Vorgaben ist daher nicht möglich.

4.2 Planungsregion Lausitz-Spreewald (LS)

Im anstehenden Abschnitt wird die Entwicklung des Überschussstromes in der Planungsregion Lausitz-Spreewald untersucht. Für diese Verbundregion wird ein nach dem Regionalen Energiekonzept Lausitz-Spreewald [RPL13] ausgewiesener Verbrauch angenommen, der sich wie folgt aufteilt:

+ Stadt Cottbus:	370 GWh/a
+ Dahme-Spreewald:	725 GWh/a
+ Elbe-Elster:	521 GWh/a
+ Oberspreewald-Lausitz:	526 GWh/a
+ Spree-Neiße:	735 GWh/a

Gleichzeitig wird die bilanzielle Erzeugung des Stromes aus EE-Anlagen analysiert und für die Jahre 2030 und 2050 fortgeschrieben. Für das Jahr 2030 stehen die Szenarien B und C des Szenariorahmens 2030 [BNA16] sowie die gesetzlichen Vorgaben nach [EEG16] zur Verfügung, die in der Tab. 4.3 dargestellt werden.

Tab. 4.3: Aktuelle und zukünftige EE-Kenndaten in der Planungsregion Lausitz-Spreewald

Art	Leistung 2013 in MW _p	Produktion 2013 in GWh/a	Produktion 2030 in GWh/a	Produktion 2050 in GWh/a
Solar	1.016	956,9	1.614-1.870	1.987
Wind	1.427	1.896,8	2.693-2.859	3.301
Wasser	3,7	13,6	13,6-15	14,5
Biomasse	91	442,5	392-442,5	411
Klärgas	5	17,6	17,6	17,6

Aufgrund der o. g. Situation versorgten sich die Untersuchungsgebiete der Planungsregion Lausitz-Spreewald im Jahr 2013 bilanziell mit 115,66 % aus EE-Anlagen stammenden Strom. Insbesondere das Lastzentrum Cottbus und der mit einer vergleichsweise niedrigen EE-Kapazität ausgebaute Kreis Spree-Neiße (EE-Eigenversorgungsanteil: 62 %) stellen die Hauptabnehmer des in der restlichen Region Lausitz-Spreewald erzeugten EE-Stromes dar. Die angefügte Grafik (siehe Abb. 4.2) fasst die Veränderung des Eigenversorgungsanteils mit EE-Anlagen bis 2050 zusammen.

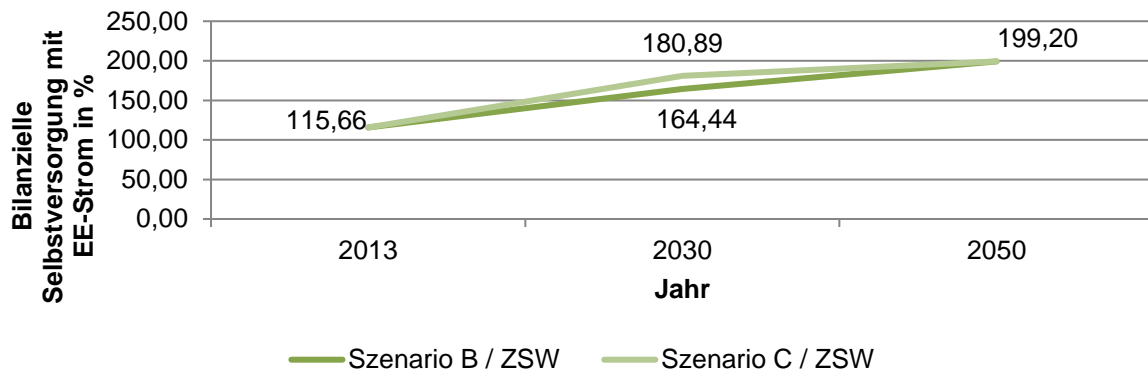


Abb. 4.2: Entwicklung des Eigenversorgungsanteils in der Region LS bis 2050

Für die analysierte Planungsregion Lausitz-Spreewald stehen bereits jetzt bilanziell EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G (nach den in Kapitel 2 genannten Bedingungen) geeignet wären. Diese belaufen sich in der Gesamtregion auf:

- + 2013: 450 GWh/a,
- + 2030: 1.854-2.327 GWh/a und
- + 2050: 2.854 GWh/a.

Der Vergleich mit den spezifischen Energie- und Klimaschutzkonzept der Verbundregion Lausitz-Spreewald [RPL13] zeigt die Unterschiede zu den o. g. theoretischen Ergebnissen auf. Aufgrund der sehr detaillierten und regionsspezifischen Untersuchung werden diese Ergebnisse nachfolgend ausführlicher behandelt.

Die Erzeugungsanlagen werden innerhalb des Konzeptes nach ihren Potenzialen analysiert und auf die Szenarien:

- + 1 (Energiestrategie des Landes Brandenburg),
- + 2 (Maximalszenario) und
- + 3 (gutachterliches Empfehlungsszenario) runtergebrochen.

Der Vergleich mit den in Tab. 4.3 erhobenen Zahlen erfolgt in einer Mittelwertbildung aus den Szenarien 1 und 3. Das Szenario 2 entfällt, aufgrund seiner teils starken Überspeisung und der nicht abzusehenden Folgen für den Netzausbau in den jeweiligen Regionen.

Die resultierenden, auftretenden großen Bandbreiten und Abweichung innerhalb der Szenarien können durch die Art der Zielstellung innerhalb des Energiekonzeptes erklärt werden. Die Abweichung zu Tab. 4.3 begründet sich primär mit den höheren Zielen der jeweiligen Regionen und Bundesländer zum Bau von EE-Anlagen, als in vergleichbaren Ausbauplänen. Beispielsweise verdeutlicht Szenario 3 (siehe Tab. 4.4) für die Bioenergie einen deutlich geringeren Ausbau, als das in Tab. 4.3 prognostizierte Vergleichsmodell.

Tab. 4.4: Ausbauprognosen nach [RPL13] im Vergleich mit Tabelle 4.3

	Wind	PV	Bioenergie	Sonstige ¹
in GWh/a				
Szenario 1: Energiestrategie 2030	5.547,4	811,8	3.923,8	608,9
Szenario 3: Empfehlungsszenario	5.614,3	3.321,8	397,7	879,3
Mittelwert	5.580,9	2.066,8	2.160,8	744,1
in %				
EE-Eigenerzeugungsquote	305,9			
Abweichung Tabelle 5	201,0	118,6	518,0	2.332,4

Ein weiterer relevanter Unterschied konnte in der Darstellung der zukünftigen Stromverbräuche festgemacht werden. Nach [RPL13] wird für die Region Lausitz-Spreewald trotz sinkender Bevölkerungszahlen, steigender Effizienz und weiterhin bestehender Bemühungen zur Energieeinsparung, eine Verbrauchssteigerung prognostiziert. Diese umfasst eine Erhöhung des Verbrauches um 350 GWh bis 2025, der insbesondere mit dem Trend zur vermehrten Nutzung von Strom zur Wärmebereitung, der zunehmenden elektrischen Ausstattung privater Haushalte sowie dem vermehrten Einsatz von Elektronik in der Industrie begründet wird. Linear fortgeschrieben wird daher für 2030 mit einem Gesamtverbrauch von bis zu 3.450 GWh/a ausgegangen.

Eine Abschätzung der Entwicklung nach 2030 ist aufgrund fehlender Daten im Energiekonzept nicht möglich. Für 2030 können nach dem Modell Überschüsse von bis zu 7.000 GWh/a für die Umwandlung in P2G oder P2H erreicht werden. Vergleicht man diese Zahlen mit den Erkenntnissen aus den in Kapitel 3 ermittelten Umfängen für den Überschussstrom deutschlandweit, kann trotz angenommener steigender Stromverbräuche von einer deutlichen Überbewertung der EE-Anlagenanzahl im Jahr 2030 innerhalb Brandenburgs ausgegangen werden.

5 Wärmepumpen

Durch die Umwandlung fossiler Primärenergieträger bzw. Brennstoffe in thermische Energie (Heizen) werden eine Vielzahl umweltschädliche Stoffe wie Stickoxide, Ruß, Schwefeldioxid, CO₂ und weitere Schadstoffe emittiert. Wärmepumpen wenden durch Zuführung elektrischer Energie technische Arbeit auf, um der Umgebung thermische Energie zu entziehen. Mittels Kältemittelverdichtung wird diese Energie auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und konventionellen Heizwecken zugeführt. Ein dezentraler Einsatz von Wärmepumpen in Haushalten die durch alternative Energien betrieben werden, kann im dementsprechenden Umfang zur Minderung von Emissionen beitragen.

¹ Sonstiges: Wird verglichen mit der Summe aus Wasserkraft und Klärgas. In [RPL13] fehlen entsprechende Kennzeichnungen zur Definition des Begriffes. Größere Abweichung aufgrund fehlender Definitionen des Umfanges sonstiger Energieträger müssen daher in Kauf genommen werden.

Dabei sind verfügbare Wärmequellen das Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser, Außenluft und die Umwelt (siehe Abb. 5.1). Die Wahl der Wärmequelle ist stark von den Bedingungen am jeweiligen Standort abhängig. Fast zwei Drittel der derzeit neu installierten Wärmepumpen im privaten Wohnungsbau, arbeiten mit Erdwärmetauschern (z. B.: Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren) [AYD15].

Das vereinfachte Funktionsprinzip strombetriebene Kompressions-Wärmepumpen sowie Ab- und Adsorptionswärmepumpen (Elektrowärmepumpen) wird für Niedertemperaturquellen und erdgekoppelte Wärmepumpen in Abb. 5.1 dargestellt.



Abb. 5.1: Möglichkeiten der thermischen Nutzung durch Wärmepumpen: Erdwärmequellen (links), Niedertemperatur (rechts), angelehnt an [STE14]

In den letzten Jahren konnte insbesondere die Effizienz von Luft-Wärmepumpen (siehe Abb. 5.1, rechte Seite) gesteigert werden. Bei heutzutage üblichen Dämmstandards für neue oder nach aktuellem EnEV-Standard sanierten Häusern, kann von Jahresarbeitszahlen von mindestens 3,1 (Luft), 4,3 (Sole) und 4,3 (Grundwasser) ausgegangen werden. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) berechnet sich nach der Formel:

$$JAZ = \frac{Q_{th}}{W_{el}} = \frac{\int_0^{8760} \dot{Q}_{th} dt}{\int_0^{8760} P_{el} dt} \quad (5.1.)$$

und beschreibt die Effektivität der Wärmepumpe über ein Jahr. Nach DIN EN 14511 wird dabei die abgegebene nutzbare Wärmeenergie (Q_{th}) auf die für den Antrieb des Verdichters und der Hilfsantriebe eingesetzte elektrische Arbeit (W_{el}) bezogen. In Zusammenhang mit der Leistungszahl (ε_{WP}):

$$\varepsilon_{WP} = f(\dot{Q}_{th}, P_{el}) = \frac{\dot{Q}_{th}}{P_{el}} \quad (5.2.)$$

(kurz: COP – engl. Coefficient of performance), die das Verhältnis des bei bestimmten Betriebsbedingungen abgegebenen Nutzwärmestroms bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung (P_{el}) durch Antriebe nach DIN EN 14511 / DIN EN 255-3 beschreibt, kann auf die Effektivität der Wärmepumpe geschlossen werden. Es gilt, je höher JAZ und ε_{WP} , desto besser die Wärmepumpe in der eingebauten Umgebung [AFJ96]. In

Sanierungsfällen und Neubaugebieten wird vermehrt auf die Technik der elektrisch angetriebenen Wärmepumpen als ausschließlicher oder kombinierter Wärmeerzeuger zurückgegriffen. Eine steigende Belastung des Verteilnetzes bei ungerichteter oder wärmegeführter Betriebsweise ist die Folge. Gelingt es, den Betrieb der Wärmepumpen gezielt zu optimieren und in Zeiten von Wirkleistungsüberschüssen zu verlagern, kann eine Entlastung der elektrischen Netze ermöglicht werden. Ein typisches Standardlastprofil einer Wärmepumpe zeigt (siehe [EON12]), dass vor allem nachts und im Winter eine zusätzliche elektrische Last durch den Einsatz von Wärmepumpen besteht.

5.1 Entwicklung des zukünftigen Wärmepumpeneinsatzes in Deutschland

Der elektrische Wirkleistungseinfluss von Wärmepumpen auf den Strommarkt ist bisher anhand verschiedener Beispiele von Neubauten [TEN15] und nationalen Modellrechnungen [BWP15], [BMU12], [BEE11] analysiert worden. Im Folgenden soll mithilfe dieser Informationen die Auswirkung von konventionell betriebenen Wärmepumpen am Strommarkt beschrieben und mögliche Nutzungsansätze für Überschussenergie erläutert werden.

Allgemein lässt sich festhalten, dass wie bei P2H und P2G die Idee besteht, die dezentral erzeugte Energie noch am Produktionsort zu verbrauchen. Dieser Verbrauch beruht auf der Vorstellung der sektorenübergreifenden Nutzung von Energie. Dabei verändert sich jedoch gleichzeitig die Wertigkeit der Energieträger, die einen Bezug auf die Wandlungsmöglichkeiten in andere Energiearten definiert. Thermische Energie oder Raumwärme kann kaum oder nur mit großem technischen Aufwand in andere Energieformen umgewandelt werden, hat damit also eine geringe Wertigkeit als die elektrische Energie.

Dennoch kann die Umwandlung insbesondere in Zukunft bei der prognostizierten Überschussmenge an elektrische Energie eine Lösungsoption zur Bereitstellung zusätzlicher negativer Leistung sein. Hierfür muss die Menge an Wärmepumpen abgeschätzt und in Bezug auf die Überschussenergie bewertet werden. Die genannten Studien [BWP15], [BMU12], [BEE11] geben hierfür erste Hinweise (siehe Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Nationaler Strombedarf der Wärmepumpen aus den Studien in TWh/a

Szenarien in TWh/a	BWP15	BMU12	BEE11 ²
2015	4,4	4,8 ³	4,8
2020	5,3-5,9	7,1-8,7	7,1-8,7
2030	7,7-11,3	11,3-16,8	11,3-16,8
2050	k. A.	14-25 ⁴	k. A.

² Keine detaillierten Angaben, Annahme wie [BMU12]

³ [BMU12] und [BEE11] haben das Anfangsjahr 2011 gesetzt. Die Zahlen für 2015 wurden linear interpoliert.

⁴ Starke Schwankungen sind Szenarien abhängig

Die stark abweichenden Zahlen zwischen der [BMU12], [BEE11] auf der einen Seite und der [BWP15] auf der anderen, können durch die Erhebungsjahre und existierenden Vergleichszahlen begründet werden. In früheren Ausgaben der Branchenstudie des Bundesverbandes für Wärmepumpen e.V. (kurz BWP) zur Prognose der Branchenentwicklung, war die Erwartungshaltung deutlich optimistischer ausgeprägt. Gerechnet wurde bis 2030 mit einem steigenden Absatz auf rund 300.000 Anlagen pro Jahr und einem Gesamtbestand von über 4,5 Mio. Anlagen. Im Vergleich dazu sind die aktuell prognostizierten Werte (66.000-149.000 Anlagen pro Jahren bzw. 1,61-2,37 Mio. Anlagen bis 2030) deutlich zurückhaltender als die konservativsten Prognosen. Begründet wird dies, u. a. mit:

- + den Auswirkungen der massiven Konjunkturkrise in den Jahren 2009/10,
- + der regulatorisch unklaren Lage (Förderstopp beim Marktanzreizprogramm für Wärmepumpen, wiederholte Diskussionen um eine Steuerförderung/Prämie für Heizungsanlagen), welche zu einer nachhaltigen Verunsicherung der Verbraucher führt und
- + den verschlechterten ökonomischen Bedingungen im Vergleich zu den Konkurrenzprodukten (Strompreisanstieg und Öl- bzw. Gaspreisverfall) [BWP15].

Aufgrund der Aktualität der Einschätzung und der Einpreisung dieser Faktoren wird sich daher im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Zahlen der BWP-Branchenprognose 2015 berufen. Der aktuelle Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2017-2030 [NEP16] stützt diese Prognosewerte zusätzlich.

Um eine Abschätzung zur Entwicklung der jeweiligen Untersuchungsregionen geben zu können, werden die Annahme aus den Energie- und Klimaschutzkonzepten entnommen. Für die Untersuchungsregion Potsdam / Potsdam-Mittelmark (PPM) können jedoch nur die Potenziale, der mittels Wärmepumpen bereitgestellten, thermischen Energie ermittelt werden. Sie beträgt zwischen 170-190 GWh/a, auf Basis der Daten aus dem Branchenreport [BWP15] wird der elektrische Stromverbrauch auf 68-76 GWh/a beziffert. Eine Bestimmung zeitbezogener Ausbauzahlen oder Zielprognosen anhand der vorliegenden Daten ist nicht möglich.

In der Planungsregion Lausitz-Spreewald wurden 2010 fast 28 GWh/a Stromverbrauch über die Nutzung von Wärmepumpen realisiert. Das entspricht einem Anteil von 0,9 % am Gesamtstromverbrauch. Da keine weiteren Zahlen zum Ausbau der Wärmepumpen in der Region angeführt werden, wird durch die Nutzung der prognostizierten nationalen Ausbauszenarien eine Skalierung auf die Region durchgeführt. Der Anteil des Stromverbrauches von Wärmepumpen wird demnach für die Jahre 2030 auf 69-101 GWh/a prognostiziert. Der Anteil am Gesamtstromverbrauch steigt damit kontinuierlich auf 1,5-1,7 % (2020) bzw. 2,0-3,0 % (2030) an [RPL13].

Eine Bewertung der Entwicklung bis 2050 kann aufgrund fehlender Daten nicht vorgenommen werden.

Ungesteuert stellen Wärmepumpen also eine zusätzliche Last, um die in Tab. 5.1 bzw. in den vorangegangenen Abschnitten angeführten Umfänge dar. Hinzu kommt ein Grundproblem volatiler nicht lastbezogener Erzeugungseinheiten. Die Zeiträume mit hoher EE-Ein- oder Überspeisung sind meist ungleich zu denen mit einem hohen Heizwärmebedarf. Diese Feststellung kann mit der Begrifflichkeit der Thermosensibilität umschrieben werden. Der Begriff stammt aus dem französischen Stromsystem (franz.: „thermosensibilité“) und beschreibt die Entwicklung der Stromlaststeigerung pro Kelvin sinkender Außentemperatur. Diese Thermosensibilität steigt seit Jahren beständig an und liegt in Frankreich bei über 2,3 GW je Kelvin [GRA12] [RTE12]. Die Werte für Deutschland belaufen sich auf 0,5 bis 1 GW je Kelvin [BAZ14]. Ein ungesteuerter vermehrter Einsatz von Wärmepumpen, womöglich noch ohne Wärmespeicher, führt demnach ggf. zur Nutzung zusätzlicher konventioneller Stromerzeugungskapazitäten, um die durch die prognostizierte Umrüstung entstehenden Wärmenachfrage bedienen zu können.

5.2 Prognostizierte Be- und Entlastung der elektrischen Netze durch den Einsatz von Wärmepumpen

Wärmepumpen können als Lastsenke sowohl be- als auch entlastend auf das Stromsystem einwirken. Sie sind in der Lage sowohl direkte Heizenergie bereitzustellen, als auch mittels der thermischen Trägheit des einschließenden Gebäudes oder mittels eines Warmwasserspeichers als Speichermedium eine zeitliche Lastverschiebung zu ermöglichen. Auf diese entlastende Wirkung wird im Folgenden näher eingegangen.

Wärmepumpen können ungesteuert (also wärmegeführt), netzgeführt sowie stromgeführt betrieben werden. Bei einem ungesteuerten Betrieb erfolgt die Deckung der Normheizlast (nach EN 12831: Leistung zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Raumtemperatur) mittels verschiedener Betriebsweisen. Neben einer monovalenten Auslegung, in welcher die Wärmepumpe alleinig zur Erbringung der Normheizlast aufkommen muss, gibt es noch verschiedene Kombinationen von Systemen (bivalent, monoenergetisch, bivalent-teilparallel) [TEN15].

Bei einem stromgeführten Betrieb werden Zusammenschlüsse aus Wärmepumpen in den Strommarkt integriert. Dadurch wird der Einsatz der Wärmepumpensteuerung an die Strompreise gekoppelt und durch bidirektionale Kommunikationseinrichtungen gesteuert. Die am Strommarkt positionierten Einheiten können (im Vergleich zu einem Stromspeicher) sowohl

- + durch Abregelung die Last senken (also erzeugen) als auch
- + durch eine verstärkte Leistungsaufnahme die Stromnachfrage erhöhen (also speichern).

Ein alleiniger, stromgeführter Betrieb ist hingegen nicht möglich, da durchweg die thermischen Begrenzungen der Umgebung gelten (wärmegeführte Bedarfsgrenze, Leistungsgrenze der Wärmepumpe, Maximaltemperatur, Verschleiß der Wärmepumpe) [NAB11].

Ähnlich wie Batteriespeicher [PLE14] bieten steuerbare Lasten, also z. B.: Wärmepumpen die Möglichkeit, den Netzzustand zu optimieren und damit langfristig Ausbaukosten zu reduzieren [RUP15]. Die Wärmepumpen werden hierbei zentral und in Abhängigkeit der gemessenen Spannung zur Stabilisierung des Stromnetzes herangezogen. Die Regelung kann dabei iterativ erfolgen und ab Spannungsabfällen/-anstiegen auf unter/über 0,99/1,01 p. u. die elektrische Leistungsaufnahme anpassen. Dieser netzgeführte Betrieb kann neben einer regionalen Steuerung im Rahmen von Smart Grids, ebenfalls perspektivisch auch überregional und im Zusammenschluss (in Form von Regelleistungsbereitstellung) erfolgen. Eine automatisierte, zentrale Steuerung oder eine auf statistischen Untersuchungen aufgebaute Zeitsteuerung sind zur Ermittlung der Regelung einsetzbar. Es gelten weiterhin die gleichen Restriktionen wie bei einem stromgeführten Einsatz.

Neben diesen Varianten der Betriebsführung gibt es noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Zu erwähnen sei hier die stromgeführte Betriebsweise zur Erhöhung des Eigenverbrauchs. Es wird versucht die Betriebszeit der Wärmepumpe in die Zeit der maximalen kumulierten EE-Einspeisung zu verlagern, ohne die genannten Restriktionen zu verletzen [TEN15].

Die mögliche Entlastungsleistung der jeweiligen Betriebsweise wird in verschiedenen Studien unterschiedlich bewertet. Eine Abregelung überschüssiger EE-Energiemengen kann nach [NAB11] in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien zwischen 13-18% reduziert werden. Bei einer netzgeführten Betriebsweise konnte eine mittlere Reduktion der abgeregelten Energie im Netzgebiet von ca. 11 % ermittelt werden [RUP15]. In [BRU15], [TEN15] wird gezeigt, dass die Reduktion der Rückspeisewirkleistung abhängig vom Monat und der Tageszeit ist. So ergibt sich im Januar eine Reduktion von ca. 33 % und im Juli eine Reduktion von ca. 9 %. Ausgehend von diesen Zahlen wird eine hypothetische Reduktion der EE-Überschussmenge durch Wärmepumpen für das Jahr 2030 von bis zu 10 % als umsetzbar angesehen. Für die Untersuchungsregionen bedeutet dies eine Verringerung der Überschussenergiemenge von 26 GWh/a (Landkreis PPM) bzw. 185-233 GWh/a (Planungsregion Lausitz-Spreewald).

Durch eine Vielzahl an Optionen kann die Reduktion der Überschussmenge durch Wärmepumpen weiter erhöht werden. Einerseits könnten bestehende Wärmespeicher vergrößert oder zusätzliche Pufferspeicher installiert werden. Andererseits kann eine Überdimensionierung der Wärmepumpen zu weiteren Kapazitäten in der optimierten Wärmeversorgung und einer Steigerung der Flexibilität beitragen [TEN15].

Diese theoretische Entlastung durch Wärmepumpeneinsatz wird aktuell auch in einem Projekt in Bayern getestet. In Schwabmünchen bei Augsburg wird das Pilotprojekt „Smart Operator“ von RWE Int. SE (RWE) und der Lechwerke AG (LEW) durchgeführt, welches über 110 Haushalte in einem Gesamtsystem verbindet. Neben PV-Anlagen, Batteriespeichern, Steuereinheiten und Smart Metern sind u. a. auch Wärmepumpen direkt als schalt- und steuerbare Verbraucher im System integriert. Eines der Hauptziele des Projekts ist die Optimierung der autonom arbeitenden Steuerung, die den Verbrauch von Wärmepumpen in Zeiten hoher PV-Eigenerzeugung verlagern soll. Damit wird der Eigenversorgungsanteil im systemischen Ortsnetz erhöht, weniger überschüssige Energie zurückgespeist und der Strombezug über das Mittelspannungsnetz reduziert. Die Rückspeisung in das überlagerte Netz konnte an Tagen mit hoher PV-Einstrahlung durch die Verknüpfung der zur Verfügung stehenden Optionen um bis zu 33 % reduziert werden [BWP16].

Andere wissenschaftliche Auswertungen haben im Gegensatz dazu gezeigt, dass gegenwärtig noch keine gesamtsystemischen EE-Überschüsse vorhanden sind, die zur residualen Nutzung herangezogen werden könnten. Im schlechtesten Fall können Wärmepumpen als auch Elektroheizkessel sogar zur Schaffung einer zusätzlichen Stromnachfrage führen, die durch konventionelle Kraftwerke gedeckt werden muss [HAU13]. Die Herausforderung der Zukunft liegt folglich darin, den Wärme- und auch Strombedarf von Verbrauchern exakt zu bilanzieren, um ein Gesamtsystem aus Wärmepumpe und -speicher sowie EE-Erzeuger und -speicher auf der Basis des vom Nutzer gewünschten thermischen und elektrischen Autarkiegrades auszulegen.

6 Fazit und Ausblick

Eine Kopplung zwischen den Sektoren Strom und Wärme ist für das Gelingen der Energiewende unabdingbar. Die aufgezeigten nationalen Stromüberschüsse können nicht mehr nur in Stromspeicher jeglicher Art zwischen gespeichert werden, es bedarf auch einer Umwandlung in andere Energieformen. Die Auswertung zeigt, dass deutschlandweit 10 bis 20 TWh/a (2030) bzw. 20 bis 50 TWh/a (2050) an durch EE-Anlagen erzeugter Überschussenergie zur Verfügung steht. Der Region PPM stehen bilanziell keine oder nur geringfügige EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G geeignet wäre. Vereinzelt auftretende minütliche oder stündliche Überspeisungen (meist in der Nacht oder zu Feiertagen) sind von dieser Feststellung ausgenommen.

Für die analysierte Planungsregion Lausitz-Spreewald stehen bereits jetzt bilanziell EE-Erzeugungsüberschüsse zur Verfügung, die für die Wandlung in P2H oder P2G geeignet wären. Es wird davon ausgegangen, dass diese in den nächsten Jahrzehnten weiter steigen. Die EE-Erzeugungsüberschüsse in der Gesamtregion belaufen sich auf:

- + 450 GWh/a (2013)
- + 1.850-2.330 GWh/a (2030) und
- + 2.850 GWh/a (2050).

Die in den Untersuchungsregionen aufgezeigte Überschussmenge kann vielmehr von keiner Speicherform ausschließlich aufgefangen werden. Es bedarf einer kombinierten, intelligenten und gesteuerten Nutzung der genannten technischen Umwandlungsoptionen um das Zielviereck der Energiewirtschaft zu erhalten. Die Systemstabilität muss in Einklang gebracht werden mit den ökonomischen, ökologischen und regionalen Bedürfnissen der jeweiligen Akteure.

Neben Power-to-Gas dienen auch Power-to-Heat sowie Wärmepumpen als Möglichkeit zur sektorübergreifenden Durchdringung der überschüssigen Energiemengen. Eine weiterführende Betrachtung der Wärmepumpenentwicklung in Deutschland und den Planungsregionen erfolgt auf Basis des potentiellen Strombedarfes dieser Anlagen. Dabei konnte festgestellt werden, dass in Deutschland bis 2030 ca. 7-18 TWh und bis 2050 bis zu 25 TWh/a zusätzlicher Strombedarf durch den Ausbau von Wärmepumpen besteht.

Für die Untersuchungsregion Potsdam / Potsdam-Mittelmark (PPM) wurden elektrische Stromverbräuche für Wärmepumpen von bis zu 75 GWh/a ermittelt (2030). In der Planungsregion Lausitz-Spreewald wird der Anteil des Stromverbrauches von Wärmepumpen für die Jahre 2030 auf 70 bis 100 GWh/a prognostiziert, was ca. 1/20 der EE-Überschussmenge entspricht. Eine Bewertung der Entwicklung bis 2050 kann aufgrund fehlender Daten nicht vorgenommen werden. Der Vergleich mit den voraussichtlich zur Verfügung stehenden EE-Überschussmengen zeigt einerseits, dass diese zur Deckung des zukünftig möglichen Wärmepumpen-Strombedarfes ausreichen. Andererseits wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Flächenerzeugungen und Lastsenken weiter ansteigen wird und ein zusätzlicher Stromtransport durch die prognostizierte Installation von Wärmepumpen erfolgt. Eine sektorübergreifende Durchdringung der Überschussstrommengen muss daher zukünftig fokussiert umgesetzt werden, um die volkswirtschaftlichen und energetischen Verluste zu minimieren. Um eine flächendeckende Nutzung der aufgezeigten Optionen in Zukunft vorzufinden, bedarf es einiger Game changer, die als Katalysator oder als Abbau von Hemmnissen angesehen werden können.

Als Game changer für Power-to-Gas kann die strikte Einhaltung der Ziele der Energiewende angesehen werden. Parallel dazu kann sich eine steigende Nachfrage aus anderen Sektoren, wie dem Verkehrssektor, positiv auf den Bedarf auswirken. Dies lässt ab einer gewissen EE-Quote die Wahrscheinlichkeit des Einsatzes dieser Technologie steigen.

Um den Einsatz von Wärmepumpen zu steigern sollten Bauvorschriften/Regelwerke umgesetzt werden, die ein Mindestnutzungsmaß an Energie aus erneuerbaren Quellen vorschreiben (siehe EEWärmeG). Ein stärkeres Anreizsystem oder eine Auffrischung der Fördermöglichkeiten (MAP) können die Durchdringung der Wärmepumpen ebenfalls erhöhen.

„Besonders interessant sind Systeme, die einen Übergang zwischen Strom und Wärme schaffen (z. B. Wärmepumpen mit großen Pufferspeichern für Starkwindzeiten im Winter), immer dann wenn Strom als Strom beim besten Willen nicht mehr sinnvoll unterzubringen ist. Immerhin wollen wir nicht eine Stromwende, sondern eine Energiewende hin zu 100% erneuerbaren Energien und da gehören Raumwärme und Mobilität als große Brocken dazu.“

- Wolfhart Dürrschmidt, 2013 (Quelle: [NEN13])

(Dr. Dürrschmidt war bis 2012 Referatsleiter am Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) im Bereich EE, aktuell ist er Fellow am IÖW)

7 Literaturverzeichnis

- [AFJ96] - Afjei, T., Betschart, W., Bircher, R., et. al (1996): *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe – Phase 4: Technisches Handbuch*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie, Oberburg, Schweiz.
- [AGR14] - Agora Energiewende (2014): *Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energie*, Berlin, Juni 2014. Abruf: 11.07.2016, URL: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2013/power-to-heat/Agora_PtH_Langfassung_WEB.pdf
- [AHK14] - Arbeitsgemeinschaft der Hessischen Industrie- und Handelskammern (Hrsg.) (2014): *Faktenblatt Power to Heat*, Wetzlar. Abruf: 12.07.2016, URL: https://www.ffegmbh.de/download/informationen/528_ihk_hessen_waerme/fb_power-to-heat.pdf
- [AYD15] - Aydemir, A. (2015): *Wärmepumpen*. In: *Energietechnologien der Zukunft*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. S. 383-397.
- [BAZ14] - Badische Zeitung (2014): *Weniger Strom stammt aus fossilen Energieträger*. Artikel vom 20. Dezember 2014. Abruf: 27.07.2016, URL: <http://www.badische-zeitung.de/wirtschaft-3/weniger-strom-stammt-aus-fossilen-energetraegern--97421834.html>
- [BEE12] - Bundesverband Erneuerbare Energie e. V. (2012): *Szenario zum Ausbau der erneuerbaren Energien und zur Entwicklung des Stromverbrauchs*. Berlin, 25.05.2012
- [BMU12] - Nitsch J., Pregger T., Naegler T., et al.: DLR, Fraunhofer, IfnE (Hrsg.) (2012): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Studie im Auftrag des BMU, 2012 Abruf: 12.07.2016, URL: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf
- [BNA11] - Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt (Hrsg.) (2011): *Power-to-Gas - Erdgasinfrastruktur als Energiespeicher - Vielversprechender Ansatz zur Lösung der Speicherproblematik*. Abruf: 18.07.2016, URL: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2011/111122_PowerToGas.html
- [BNA15] - Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt (Hrsg.) (2015): *Monitoringbericht 2015*, Abruf: 13.07.2016, URL: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2015/Monitoringbericht_2015_BA.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [BNA16] - Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt (Hrsg.) (2016): *Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungspläne Strom 2017-2030*. Abruf: 20.07.2016 URL: http://data.netzausbau.de/2030/Szenariorahmen_2030_Genehmigung.pdf
- [BNA16a] - Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt (Hrsg.) (2016): *Monitoringbericht 2016*, Abruf: 30.11.2016, URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschUndMonitoring/Monitoring/Monitoringbericht2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [BRU15] - Brunner, M.; Rudion, K.; Tenbohlen, S. (2015): *Voltage Support in Distribution Grids Using Heat Pumps*. 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 15-18 June 2015.
- [BWP15] - Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. (2015): *BWP-Branchenstudie 2015 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen*. Berlin, 2015

- [BWP16] - Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. (2016): *Im Praxistest: Siedlung erprobt Lastmanagement mit Wärmepumpen*. Artikel vom 17.06.2016, Abruf: 03.08.2016, URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/pressefahrten/allgaeu-2016/artikel/details/im-praxistest-siedlung-erprobt-lastmanagement-mit-waermepumpen/>
- [DEA12] - Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2012): *Präsentationenauf der Conference on Capacity Mechanisms: Experiences in various European Countries*. Abruf: 27.07.2016 URL: <http://www.dena.de/veranstaltungen/archiv/conference-on-capacity-mechanisms-experiences-in-various-europeancountries.html>
- [DEA16] - Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2016): *WindGas Falkenhagen*. Abruf: 04.08.2016 URL: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/windgas-falkenhagen/>
- [DLR14] - Scholz, Y., et al. (2014): *Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- [EEG16] - Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2016), Abruf: 20.07.2016 URL: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/G/gesetzentwurf-ausschreibungen-erneuerbare-energien-aenderungen-eeq-2016,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- [ELL15] - Eller, D. (2015): *Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland - Potenziale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-658-10561-7.
- [EON12] - E.ON Bayern (Hrsg.) (2012): *Temperaturabhängige Lastprofile (TLP) – HZ2*. Abruf: 26.07.2016, URL: http://www.eonbayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzzugang/Lastprofilverfahren/Temperaturabhaengige_Lastprofile/Waermepumpen_und_Direktheizung.xls
- [GRA12] - Grashof, K. (2012): *Wärmepumpen und fluktuierende Stromerzeugung - eine energiewirtschaftliche Verträglichkeitsanalyse*. Vortrag auf dem 13. Forum Solarpraxis, 22.11.2012, Berlin
- [HAU13] – Hauser, E. (2013): *Strom in Wärme- und Kältespeichern: eine energiewirtschaftliche Betrachtung*. Berliner Energietage 2013, 15.5.2013.
- [KNO08] - Knoll, C., Stadt Potsdam (Hrsg.) (2009): *Klimaschutzbericht Potsdam 2008*. Landeshauptstadt Potsdam, Oberbürgermeister, Abruf: 25.07.2016, URL: http://www.energie-forum-potsdam.de/wp-content/uploads/2009/12/klimaschutzbericht_2008_lh_potsdam.pdf
- [KRZ13] - Krzikalla, N., Achner, S. und Brühl, S. (2013): *Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien*. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. Abruf: 11.07.2016, URL: http://www.bee-ev.de/downloads/publikationen/studien/2013/130327_BET_Studie_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf.
- [KÜH16] - Kühne, J. (2016): *Power-to-(District)Heat – Kraft-Wärme-Kopplung anders betrachtet*. Berliner Energietage 2016, Abruf: 19.07.2016, URL: <http://www.energiesstage.de/details/va/2016-311.html> .
- [LPM16] - Landkreis Potsdam-Mittelmark (Hrsg.) (2016): *Energieerzeugung und Energieverbrauch - Energieverbrauch und eingespeiste erneuerbare Energie*. Abruf: 25.07.2016, URL: <http://www.potsdam-mittelmark.de/de/landkreis-verwaltung/daten-fakten/statistiken/energie/>
- [MIC15] - Michaelis, J.; Genoese, F. (2015): *Power-to-Gas*. In: *Energietechnologien der Zukunft*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. S. 229-244.
- [NAB11] - Nabe, Christian, et al. (2011): *Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien*. BMWi Vorhaben, 2011, Nr. 50/10.

- [NEN13] - Dürrschmidt, W. (2013): *Die Zukunft des EEG: Leitinstrument der Energiewende*. Neue Energie 05/2013.
- [NEP16] - Netzentwicklungsplan Strom, Übertragungsnetzbetreiber (Hrsg.) (2016): *SZENARIORAHMEN FÜR DIE NETZENTWICKLUNGSPÄNE STROM 2030 - ENTWURF DER ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER*. Abruf: 11.07.2016, URL: http://data.netzausbau.de/2030/Szenariorahmen_2030_Entwurf.pdf
- [PLE14] - Plenz, M., Schatz, K., Lehmann, K. & Zundel, S. (2014): Netzausbau versus kleintechnische Speichereinheiten in strukturschwachen, ländlichen Räumen - Eine technisch-gesamtwirtschaftliche Bewertung auf der Niederspannungsebene. in D. Schulz (Hrsg.): *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern: Konferenzband; NEIS 2014, Hamburg, 18.-19. September 2014*, ISBN 978-3-86818-059-6.
- [POT10] - Potsdam, Landeshauptstadt (hrsg.) (2010): *Gutachten zum Integrierten Klimaschutzkonzept 2010*. V., Potsdam, Abruf: 25.07.2016, URL: <https://www.potsdam.de/sites/default/files/documents/IntegriertesKlimaschutzkonzept2010.pdf>
- [RUP15] - Rupp, L.; Brunner, M.; Tenbohlen, S. (2015): *Einfluss dezentraler Wärmepumpen auf die Netzausbaukosten des Niederspannungsnetzes*. Power and Energy Student Summit (PESS) 2015, January 13th-14th, Dortmund Germany, 2015.
- [RPG13] - Regionale Planungsgemeinschaft Havelland-Fläming (Hrsg.) (2013): *Integriertes regionales Energie- und Klimaschutzkonzept : Gesamtbericht*. Ernst Basler und Partner, Potsdam, Abruf: 20.07.2016, URL: http://digital.zlb.de/viewer/content?action=application&source-path=15878668/REK_HF_Gesamtbericht_1.pdf&format=pdf
- [RPL13] - Regionale Planungsgemeinschaft Lausitz-Spreewald (Hrsg.) (2013): *Kurzfassung Regionales Energiekonzept Lausitz-Spreewald*. Abruf: 25.07.2016, URL: <https://www.zab-energie.de/de/system/files/media-downloads/REK%20Lausitz-Spreewald-4480.pdf>
- [RTE12] - RTE 2012 (2012): *La vague de froid de février 2012*. Paris 2012, Abruf: 03.08.2016, URL: <http://www.rte-france.com/fr/actualites-dossiers/a-la-une/vague-de-froid-de-fevrier-2012-analyse-par-rte-des-consequences-sur-le-systeme-electrique-francais>
- [SCH14] – Schill, W.-P. (2014): *Entwicklung der Residuallast und hypothetischer Speicherbedarf für Überschüsse*. Abschlussworkshop des Forschungsprojekts StoRES, Berlin, 11. Dezember 2014. Abruf: 11.07.2016, URL: https://www.diw.de/documents/vortragsdokumente/220/diw_01.c.493075.de/v_2014_schill_ueberschuesse_stores7.pdf
- [SCH15] - Schatz, K., Plenz, M., Zundel, S., Lehmann, K. (2015): *Die Transaktionskosten der Energiewende in den Verteilernetzen*. In: ET. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 65(7), S. 8-12, ISSN 0720-6240
- [STE14] - Sterner, M.; Stadler, I. (2014): *Energiespeicher-Bedarf, Technologien, Integration*. Springer-Verlag.
- [TEN15] - Tenbohlen, S.; Brunner, M.; Henzler, T. (2015): *Be- und Entlastung elektrischer Verteilnetze durch Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden*. Abruf: 26.07.2016, URL: http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Endbericht_Netzbelastung_W%C3%A4rme-pumpen.pdf
- [THA16] - Thamm, H. (2016): *Power to Heat - Definition und politische Leitplanken*. Vortrag, Dialogplattform Power to Heat Stiebel Eltron, 14./15. Juni 2016, Goslar, Abruf: 11.07.2016, URL: https://www.efzn.de/fileadmin/Veranstaltungen/Power_to_Heat/P2H_2016_Vortr%C3%A4ge/15_THAMM_Dialogplattform_P2H_15-06-2016.pdf
- [ZSW14] - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) (Hrsg.) (2014): *Energie, Energiespeichertechnologien“ Dynamische Simulation der Ausbauszenarien für erneuerbare Stromversorgung in Baden-Württemberg bis 2050 nach dem Gutachten zur Vorbereitung*

eines Klimaschutzgesetzes (SimBW) Speicherbedarf in Deutschland und Baden-Württemberg. Forschungsbericht zum Programm: BWPLUS, Abruf: 20.07.2016, URL: https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Abschlussbericht_SimBW_2014.pdf

www.gebaeude-energiewende.de

