

Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien mit dem europäischen Energiesystemmodell TIMES PanEU

Julia Welsch, Ulrich Fahl, Markus Blesl, Kai Hufendiek

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart,
Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart, Telefon: +49 (0)711 685 878 48,
E-Mail: julia.welsch@ier.uni-stuttgart.de, Internet: www.ier.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Der im Energiekonzept vorgesehene Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung in Deutschland führt zu einem erhöhten Bedarf an Flexibilisierungsoptionen zum zeitlichen und räumlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage von elektrischer Energie. Das Ziel des Beitrags ist die Darstellung methodischer Ansätze zur Abbildung von Speichern und Power-to-X in Energiesystemmodellen sowie die systemanalytische Bewertung von Energiespeichern in Deutschland im Kontext des europäischen Energiesystems.

Den Ausgangspunkt bildet dabei das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU. Dieses ist ein lineares Optimierungsmodell, in dem das Energiesystem der Staaten der EU-28 sowie von Norwegen und der Schweiz modelliert ist. In TIMES PanEU sind sowohl die Energiegewinnung/-bereitstellung als auch die Energienachfrage abgebildet. Durch die Betrachtung aller Bereiche (Strom, Wärme, Mobilität) werden dabei auch die sektorübergreifenden Wechselwirkungen berücksichtigt (Sektorkopplung).

Da eine auf Typtagen basierende zeitliche Struktur für die Modellierung unterschiedlicher Speichertechnologien und ihrer Wechselwirkungen aufgrund der Darstellung eines Speichers als kontinuierlichen Prozess nicht ausreichend ist, wird für Deutschland eine höhere zeitliche Auflösung gewählt. In diesem Zusammenhang werden auch die methodischen Herausforderungen bei der Modellierung von Energiespeichern in Energiesystemmodellen diskutiert. Das Ziel der Optimierung ist die Ermittlung der kostenoptimalen Konfiguration und Einsatzstrategien von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien unter der sich gleichzeitig modellendogen ergebenden Stromnachfragestruktur.

Erste exemplarische Analysen eines Energiewendeszenarios zeigen, dass in dem gewählten Szenario mit ausgewählten Flexibilisierungsoptionen die Integration der steigenden Mengen von Strom aus erneuerbaren Energien in das Energiesystem in Deutschland bis zum Jahr 2035 insbesondere durch die Flexibilisierungsoptionen Curtailment, veränderte Stromnachfrage, Lastverschiebung und Stromaustausch erfolgen kann. Ab dem Jahr 2035 ist zusätzlich ein Zubau von großen Stromspeicherkapazitäten und Power-to-Heat ökonomisch sinnvoll. Insgesamt zeigt sich, dass weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Generierung der Nachfrage- und Einspeiseganglinien (Wind und Solar) in typtag- bzw. typwochenbasierten Energiesystemmodellen besteht, da die Wahl der Ganglinien erheblichen Einfluss auf die Residuallast und damit den Speicher- und Flexibilisierungsbedarf hat. Zukünftige Modellerweiterungen und Szenarioanalysen sollen sich darüber hinaus mit der integrierten Berücksichtigung von Elektromobilität und Nachtspeicherheizungen bzw. Power-to-Heat (mit Wärmespeichern) in Haushalten befassen.

Keywords: Energiespeicher, Stromspeicher, Wärmespeicher, Gasspeicher, Power-to-Heat, Power-to-Gas, Flexibilisierungsoptionen, Curtailment

1 Hintergrund und Zielsetzung

Der im Energiekonzept der Bundesregierung vorgesehene Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung in Deutschland führt zu einem erhöhten Bedarf an Flexibilisierungsoptionen zum zeitlichen und räumlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage von elektrischer Energie. Das Ziel des Beitrags ist die Darstellung methodischer Ansätze zur Abbildung von Speichern und Power-to-X in Energiesystemmodellen sowie die systemanalytische Bewertung von Energiespeichern in Deutschland im Kontext des europäischen Energiesystems. In diesem Zusammenhang erfolgen methodische Erweiterungen des Energiesystemmodells TIMES PanEU in Bezug auf die zeitliche Auflösung zur Modellierung von Speichertechnologien. Durch die Betrachtung aller Bereiche (Strom, Wärme, Mobilität) werden dabei auch die sektorübergreifenden Wechselwirkungen zwischen der Energiebereitstellung und -nachfrage durch den Einsatz von Power-to-X analysiert (Sektorkopplung).

2 Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU

Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU ist ein lineares Optimierungsmodell basierend auf dem Modellgenerator TIMES, der in der mathematischen Modellierungsumgebung GAMS implementiert ist. TIMES ist ein Modellgenerator für Bottom-up Energiesystemmodelle, der innerhalb des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der International Energy Agency (IEA) entwickelt wurde. In TIMES erfolgt eine Trennung zwischen der anwenderspezifischen Modellstruktur, der mathematischen Formulierung der Nebenbedingungen und dem Lösungsverfahren [1 bis 2].

In TIMES PanEU wird das Energiesystem der Staaten der EU-28 sowie von Norwegen und der Schweiz hinsichtlich seiner Gesamtsystemkosten integral optimiert. Der Modellierungszeitraum reicht von 2010 bis 2050 und ist in mehrere Zeitschritte unterteilt (5-Jahresschritte). Bei der Optimierung erfolgt eine integrale Ausbau- und Einsatzoptimierung über den gesamten Modellierungszeitraum [3 bis 5].

Das Referenzenergiesystem ist in TIMES PanEU in mehrere Bereiche gegliedert: Öffentliche Strom- und Wärmebereitstellung, sonstige Energieumwandlung (z. B. Raffinerien), Haushalte, GHD, Landwirtschaft, Transport, Industrie (inklusive Eigenerzeugung) und Bereitstellung von Energieträgern (Bild 1).

Die Modellierung der öffentlichen Strombereitstellung erfolgt auf Basis von drei Spannungsebenen: Höchst- und Hochspannung, Mittelspannung, Niederspannung. Versorgungsseitig stehen verschiedene Strombereitstellungstechnologien zur Verfügung, die die elektrische Energie in die unterschiedlichen Spannungsebenen einspeisen. Hierbei nutzen die zentralen Großkraftwerke das Höchstspannungsnetz, dezentrale Kraftwerke, wie z. B. PV-Anlagen, das Mittel- und Niederspannungsnetz. Sowohl der Kraftwerksbestand als auch die Investitionsoptionen für die folgenden Perioden sind dabei nach Technologieleistungsklassen und eingesetztem Brennstoff aggregiert. Die von den öffentlichen KWK-Anlagen und Heizwerken bereitgestellte Fernwärme wird in sektorspezifische Fernwärme umgewandelt.

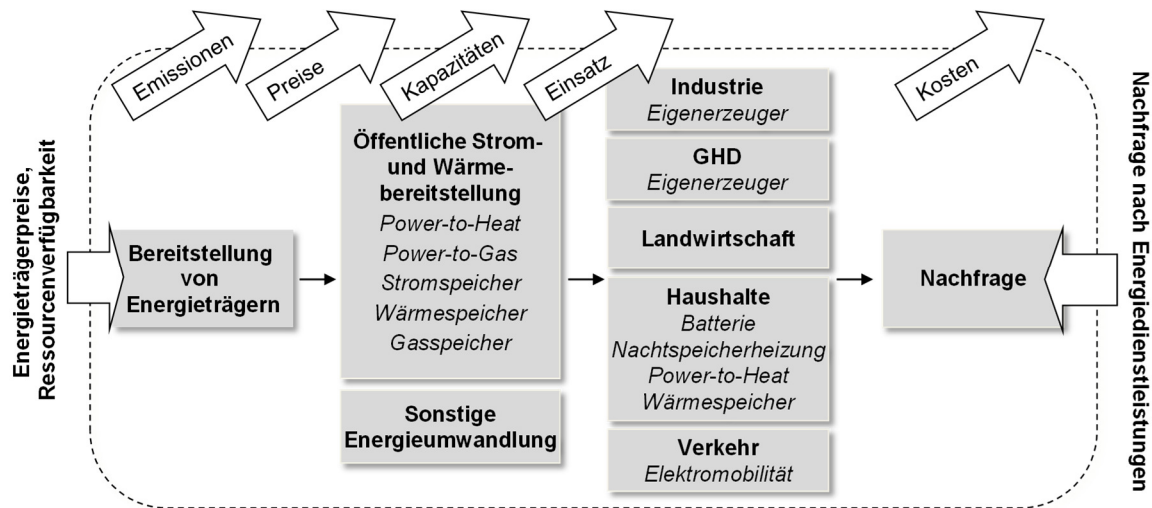


Bild 1: Grundstruktur von TIMES PanEU mit den modellierten Speicheroptionen

Hinsichtlich der Nachfrage nach Energiedienstleistungen bzw. -mengen wird in TIMES PanEU sektorspezifisch differenziert. In jeder Nachfragekategorie wird zwischen verschiedenen Investitionsoptionen, aggregiert nach Technologie und eingesetztem Endenergieträger, unterschieden.

Unterjährig ist TIMES PanEU bislang in 12 Zeitsegmente gegliedert (ein Typtag pro Jahreszeit mit je drei Zeitschritten). Die Zeitstruktur ist in Bild 2 dargestellt (R: Spring, S: Summer, F: Fall, W: Winter, D: Day, N: Night, P: Peak).

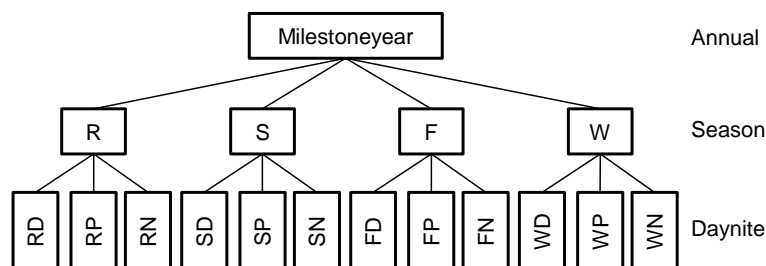


Bild 2: Zeitliche Auflösung für Resteuropa ohne Deutschland

Aufgrund des kontinuierlichen Betriebes eines Speichers ist eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung notwendig. Dazu werden im Folgenden die methodischen Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen diskutiert.

3 Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen

Eine methodische Herausforderung bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen besteht darin, sowohl die notwendige zeitliche und räumliche Struktur eines Modells als auch die Lösbarkeit des Modells zu gewährleisten [6]. Eine hohe zeitliche Auflösung, z. B. eine stündliche Auflösung, ermöglicht die Abbildung großer Schwankungen in den Einspeiseganglinien sowie die Darstellung von Lastspitzen und Lasttälern. Eine hohe zeitliche Auflösung muss dabei auf repräsentativen, zusammenhängenden, aufeinanderfolgenden Zeitsegmenten basieren. Dies ist für eine adäquate Abbildung des kontinuierlichen Betriebes eines Energiespeichers erforderlich. Die Aggregation von Zeitsegmenten führt da-

bei zu einer Glättung der Last. Mit wachsender Anzahl an Regionen und Zeitsegmenten, die integral optimiert werden, steigt die Rechenzeit exponentiell an.

Bei einer hohen räumlichen Auflösung, z. B. der Unterteilung jedes europäischen Staates in mehrere Teilregionen, können darüber hinaus Stromnetze und regional differenzierte Wärme- bzw. Fernwärmenachfragen detailliert abgebildet werden, so dass Kapazitäten der Stromnetze bzw. Fernwärmeversorgung optimiert werden können (bei Gewährleistung von Lösbarkeit und akzeptablen Rechenzeiten).

Die Herausforderung besteht darin, eine angemessene zeitliche und räumliche Struktur im Zusammenhang mit der Komplexität der Topologie einer Modellregion zu finden. Die Betrachtung aller Bereiche (Strom, Wärme, Mobilität) ermöglicht die integrierte Analyse der sektorübergreifenden Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Energiebereitstellungs- und -nachfragesektoren, z. B. durch den Einsatz von Power-to-Heat oder Power-to-Gas, erhöht jedoch gleichzeitig auch die Komplexität des Energiesystemmodells. Dabei können sowohl Speicherausbau als auch Speichereinsatz durch diese Wechselwirkungen beeinflusst werden.

Darüber hinaus stellt sich bei der Ausbau- und Einsatzoptimierung die Frage nach der Dimensionierung der Speichertechnologien hinsichtlich des Verhältnisses von Speicherkapazität und Ein- bzw. Ausspeicherleistung. Ein variables, modellendogenes Verhältnis von Speicherkapazität und Speicherleistung führt auf der einen Seite zu einem optimierten Ausbau und Einsatz von Speichertechnologien, erhöht jedoch auf der anderen Seite auch die Komplexität des Modells.

4 Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU

Zur detaillierten Abbildung von Energiespeichern ist es notwendig, in TIMES PanEU die zeitliche Auflösung für die Modellregion Deutschland zu erhöhen. Für Resteuropa wird die ursprüngliche zeitliche Auflösung beibehalten, da der Fokus bei der Modellierung und Bewertung von Speichertechnologien auf der Modellregion Deutschland liegt.

Aufgrund der zeitpunktübergreifenden Bedingungen eines Speicherprozesses, nach denen der Speicherfüllstand eines Zeitsegmentes Einfluss auf den Speicherfüllstand des nachfolgenden Zeitsegmentes hat, ist die Modellierung repräsentativer, zusammenhängender Zeitsegmente über mehrere Tage bzw. Wochen notwendig. Daher wird die zeitliche Auflösung in TIMES PanEU für Deutschland auf fünf Typwochen mit dreistündlicher Auflösung erhöht (Bild 3). Damit können kurzfristige, tagesübergreifende Speicherprozesse verbessert dargestellt werden.

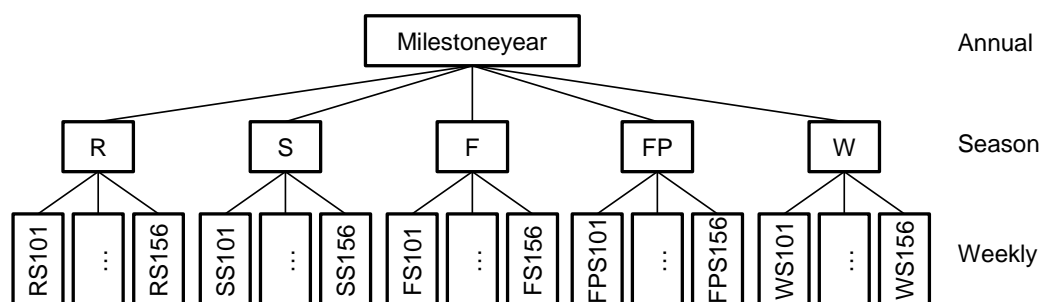


Bild 3: Zeitliche Auflösung für Deutschland

Diese fünf Typwochen setzen sich zusammen aus einer Standard-Typwoche pro Jahreszeit (224 Zeitsegmente pro Jahr) und einer zusätzlichen Herbst-Peakwoche (FP) zur Abbildung hoher Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien (56 Zeitsegmente pro Jahr).

Die Erhöhung der zeitlichen Auflösung erfordert gleichzeitig die Darstellung der Nachfrage- und Einspeiseganglinien (Wind und Solar) in höherer zeitlicher Auflösung. Hierfür ist es notwendig, den verschiedenen Nutzenergienachfragen in den einzelnen Nachfragesektoren individuelle Ganglinien zuzuordnen (Bild 4). Sowohl die nachgefragte Strommenge als auch der Stromlastgang (im Beispiel die Stromnachfrage der Haushalte) sind modellendogenes Optimierungsergebnis und verändern sich in Abhängigkeit der genutzten Stromanwendungen. Der Vorteil des TIMES PanEU Modells liegt darin, dass auch die Abbildung aller Sektoren und damit die Lastverlagerung infolge veränderter Stromnachfrage von Anwendungstechnologien berücksichtigt werden.

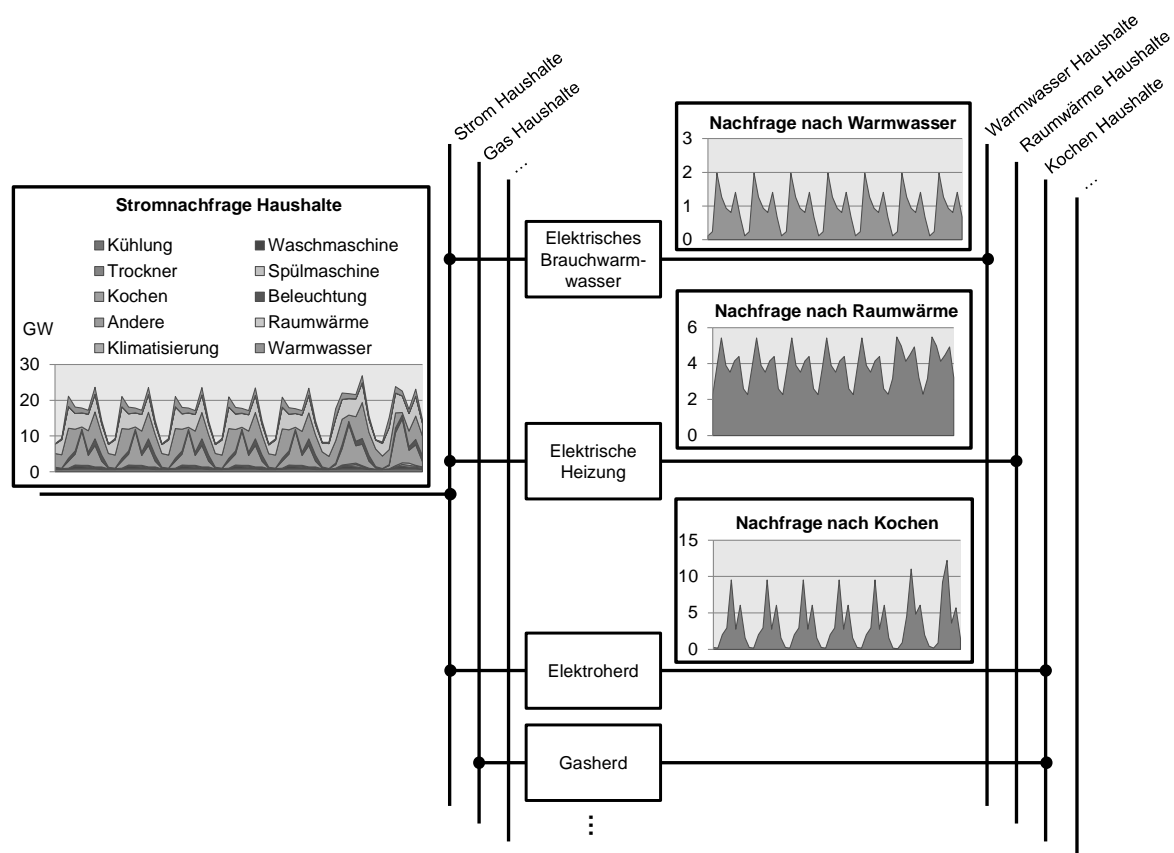


Bild 4: Nachfrageganglinien im Haushaltssektor in Deutschland

5 Speichermodellierung in TIMES PanEU

In der vorliegenden Analyse werden ausgewählte mechanische, thermische und chemische Energiespeicher betrachtet, die im Rahmen der Energiesystemmodellierung und bei der Bewertung von Speichertechnologien im deutschen und europäischen Energiesystem von besonderer Bedeutung sind. Bild 5 zeigt die in TIMES PanEU modellierten Energiespeicher und Umwandlungsprozesse.

Bei der Modellierung von Stromspeichern werden Pumpspeicherkraftwerke, adiabate und diabate Druckluftspeicherkraftwerke sowie stationäre und mobile Akkumulatoren betrachtet,

da diese Technologien in technischer und ökonomischer Hinsicht für die großtechnische Speicherung elektrischer Energie geeignet sind. Aus diesem Grund sind sie für die Flexibilisierung des Stromversorgungssystems bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien von besonderer Bedeutung. Zur Flexibilisierung des Kraftwerkeinsatzes von KWK-Anlagen und solarthermischen Kraftwerken sind der elektrische Heizstab und die Großwärmepumpe in Kombination mit einem Wärmespeicher geeignet. Auch dezentrale Wärmespeicher in Haushalten in Kombination mit elektrischen Heizstäben sowie Nachtspeicherheizungen werden in TIMES PanEU abgebildet. Zentrale Gasspeicher mit Power-to-Gas können ebenfalls zur Flexibilisierung des Energiesystems beitragen.

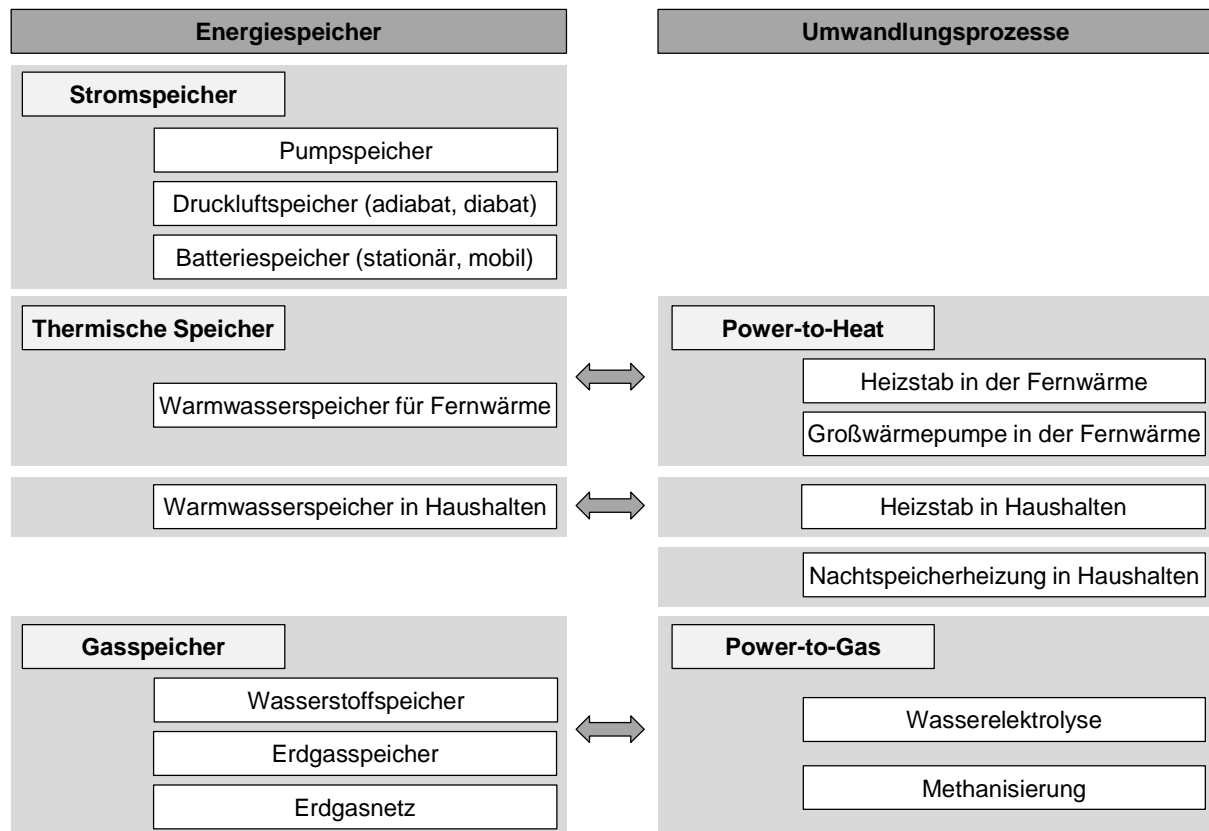


Bild 5: Energiespeicher und Umwandlungstechnologien in TIMES PanEU

Die Speicher werden in TIMES PanEU als eine Abfolge von drei Prozessen modelliert: Einspeicherprozess, Speicherprozess, Ausspeicherprozess. Dies ermöglicht ein variables, modellendogenes Verhältnis von Speicherkapazität und Speicherleistung, da dem Ein- und Ausspeicherprozess eine Leistung und dem Speicherprozess eine Energiemenge (maximaler Energieinhalt) als Kapazität zugewiesen wird. Alle Speicherprozesse, die im Folgenden beschrieben werden, arbeiten als Tagesspeicher, das heißt, der Speicherbetrieb erfolgt innerhalb einer Typwoche. Der Speicherfüllstand VAR_ACT in Zeitsegment ts ergibt sich dabei ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten vereinfacht aus dem Speicherfüllstand im vorherigen Zeitsegment zuzüglich Input VAR_SIN abzüglich Output VAR_SOUT [2]:

$$VAR_ACT(ts) = VAR_ACT(ts - 1) + VAR_SIN(ts - 1) - VAR_SOUT(ts - 1)$$

Für den Tagesspeicher gilt als Kapazitätsrestriktion, dass der Speicherfüllstand in allen Zeitsegmenten jedes Typwochentages kleiner sein muss als der maximale Energieinhalt. Der

Speicherfüllstand VAR_ACT stellt dabei den gesamten Füllstand in einem Zeitsegment dar (Wiederholung jedes Zeitschrittes in einem typstundenbasierten Modell), daher gilt [2]:

$$\frac{VAR_ACT(ts)}{\text{Anzahl der Wiederholungen eines Zeitsegmentes pro Jahr}} \leq \text{Kapazität}$$

Zusätzlich wird für die Pumpspeicher und einige Gasspeicher ein saisonaler Langzeitspeicher definiert, der in TIMES dadurch gekennzeichnet ist, dass Ein- und Ausspeicherung über die gesamte Jahreszeit mit konstanter Leistung erfolgen.

Bisherige Modellierungsansätze zur energiewirtschaftlichen Bewertung von Speichern fokussieren in erster Linie auf den Strommarkt (keine integrale Betrachtung aller Sektoren). Dabei werden Modellansätze mit einer stündlichen Auflösung herangezogen, deren Optimierungszeitraum aufgrund steigender Rechenzeiten bei einem Jahr liegt. Eine hohe räumliche Auflösung ermöglicht darüber hinaus die detaillierte Abbildung von Stromnetzen und regional differenzierter Fernwärmenachfrage. Aufgrund der Fokussierung auf den Strommarkt wird dabei die Fernwärmenachfrage als fest vorgegeben modelliert [7 bis 10].

5.1 Modellierung von Pumpspeichern und Druckluftspeichern

Pumpspeicherkraftwerke sowie diabate und adiabate Druckluftspeicherkraftwerke können in TIMES PanEU im Übertragungsnetz genutzt werden und werden sowohl für Deutschland als auch für Resteuropa modelliert (Bild 6).

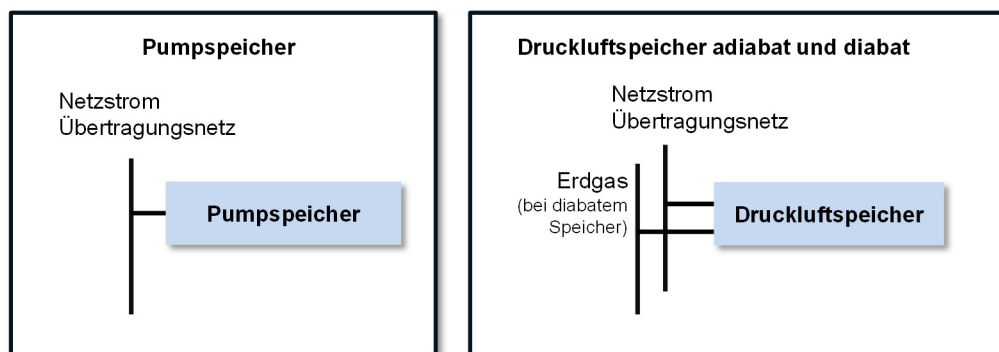


Bild 6: Modellierung von Pumpspeichern und Druckluftspeichern in TIMES PanEU

Der adiabate Druckluftspeicher wird sowohl mit einer unterirdischen Salzkaverne als auch mit einem oberirdischen Tank modelliert. Der diabate Druckluftspeicher wird in Kombination mit einer unterirdischen Salzkaverne modelliert. Dabei werden die länderspezifischen Potentiale der Salzkavernen berücksichtigt.

5.2 Modellierung von stationären Batteriespeichern

Bei den stationären Batteriespeichern wird zwischen den Batteriespeichern in Kombination mit einer PV-Dachanlage und den Batteriespeichern im Verteilnetz unterschieden. Im ersten Anwendungsfall wird der Batteriespeicher nur in Verbindung mit der PV-Anlage genutzt (Bild 7). Der durch die PV-Anlagen bereitgestellte Strom (PV-Strom) kann optional in einem Batteriespeicher zwischengespeichert werden, bevor er ins öffentliche Stromnetz eingespeist oder im Haushaltssektor selbst genutzt wird (Berücksichtigung des Eigenverbrauchs des PV-Stroms durch die Haushalte).

Dabei wird ein repräsentativer Lithium-Ionen-Akkumulator, ein Vanadium-Redox-Flow Akkumulator und ein Bleisäure-Akkumulator für die Modellierung der stationären Batteriespeicher im Netz herangezogen. Für die stationären Batteriespeicher in Haushalten stehen der Lithium-Ionen-Akku und der Bleisäure-Akku zur Verfügung. Die stationären Batteriespeicher werden sowohl für Deutschland als auch für Resteuropa modelliert.

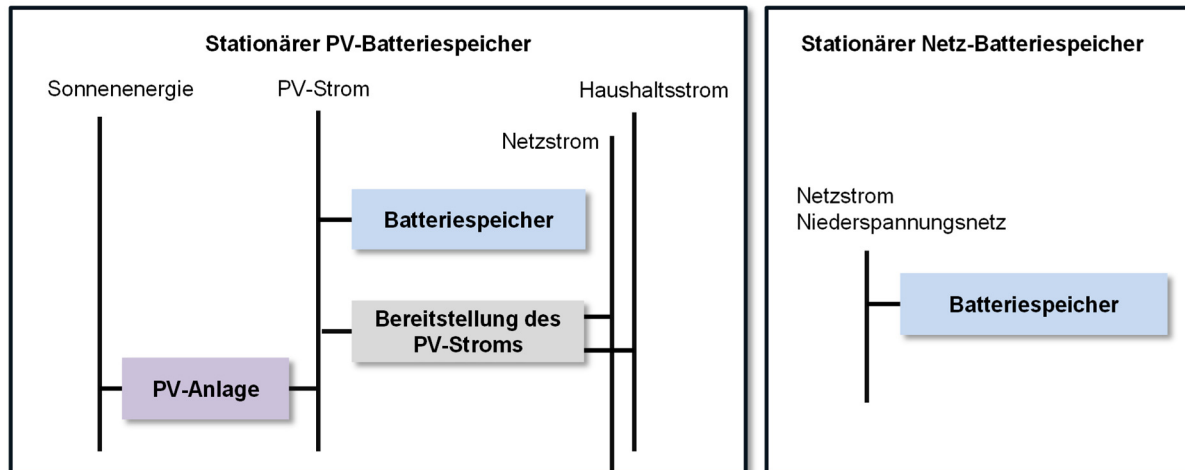


Bild 7: Modellierung stationärer Batteriespeicher in TIMES PanEU

5.3 Modellierung von Power-to-Heat mit Wärmespeichern in der Fernwärme

Bild 8 zeigt die Struktur der Modellierung der Warmwasserspeicher, Heizstäbe und Großwärmepumpen in der Fernwärme.

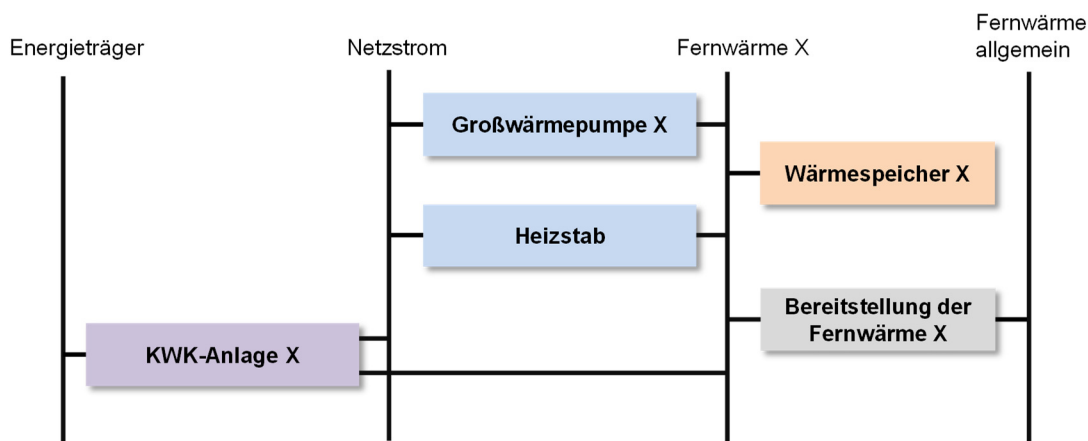


Bild 8: Modellierung von Power-to-Heat mit Wärmespeichern in der Fernwärme in TIMES PanEU

Durch die Abbildung von Deutschland als Punktmittel ohne weitere regional differenzierte Auflösung ist es nicht möglich, verschiedene Wärmeregionen innerhalb Deutschlands zu berücksichtigen. Dies führt zu einer Bündelung von Bereitstellung und Nachfrage. Das heißt, dass beispielsweise der gesamte Fernwärmebedarf durch jede Bereitstellungstechnologie gedeckt werden kann, da keine regionenspezifischen Fernwärmenetze und KWK-Anlagen bzw. Heizwerke modelliert werden können. Aus diesem Grund werden jeder KWK-Anlage eigene Investitionsoptionen für einen Warmwasserspeicher (Tank), einen Heizstab und eine Großwärmepumpe zugewiesen, die ausschließlich von dieser KWK-Anlage genutzt werden

können. Darüber hinaus wird eine Investitionsoption für Power-to-Heat mit Wärmespeicher ohne Nutzung durch eine KWK-Anlage definiert. Diese Flexibilisierungsoption wird sowohl für Deutschland als auch für Resteuropa modelliert.

5.4 Modellierung von Power-to-Gas mit Gasspeichern

Bei den Gasspeichern wird zwischen Erdgasspeichern und Wasserstoffspeichern unterschieden (Bild 9).

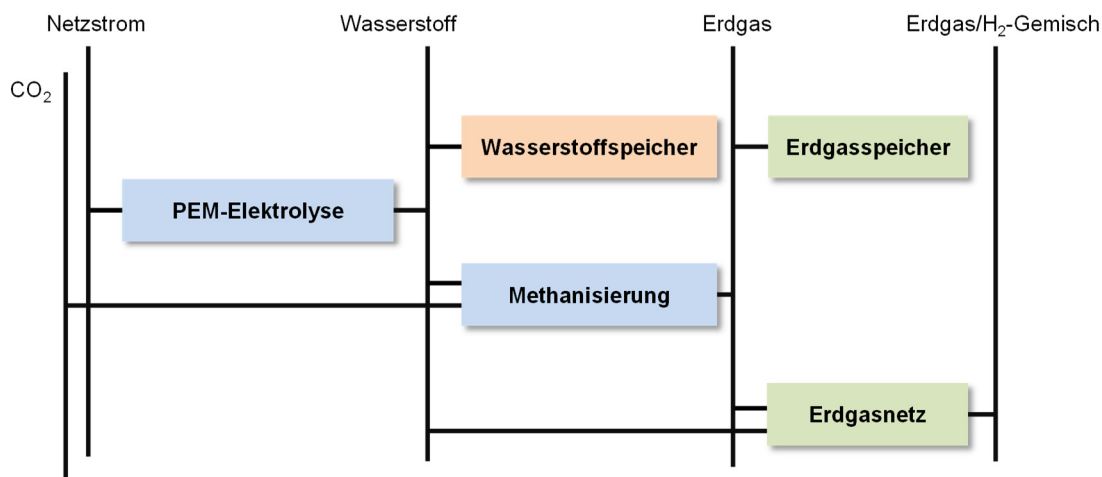


Bild 9: Modellierung von Power-to-Gas mit Gasspeichern in TIMES PanEU

Die Gasspeicher werden im öffentlichen Gasnetz genutzt. Der Wasserstoff kann hierbei durch eine PEM-Elektrolyse bereitgestellt und optional in einem Wasserstoffspeicher zwischengespeichert werden, bevor er verwendet oder dem Erdgas zugemischt wird. Durch die Methanisierung (CO₂-neutral) wird der Wasserstoff in synthetisches Methan (in der Modellierung entspricht dies dem Erdgas) umgewandelt. Dabei wird die Speicherung von Erdgas und Wasserstoff in unterirdischen Salzkavernen und in aufgebrauchten Reservoirs modelliert. Die Gasspeicher in Kombination mit Power-to-Gas werden sowohl für Deutschland als auch für Resteuropa modelliert. Dabei werden die länderspezifischen Potentiale der Salzkavernen und Reservoirs berücksichtigt.

5.5 Modellierung von Power-to-Heat mit Wärmespeicher in Haushalten

Die dezentralen Flexibilisierungsoptionen (Wärmespeicher und Power-to-Heat in Haushalten) werden für den Deutschland Teil von TIMES PanEU modelliert (Bild 10). Die Wärmespeicher mit Power-to-Heat werden sowohl für die Single-Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme als auch für die Dual-Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser modelliert. Zur Reduktion der Modellgröße werden dabei jeweils bestimmte Technologiegruppen gebildet, für die eine Investitionsoption für einen Wärmespeicher (Tank) und einen Heizstab zur Verfügung steht. Bei der Gruppenbildung wird zwischen Single- und Dual-Technologien sowie zwischen verschiedenen Brennstoffen unterschieden. Dabei werden folgende Brennstoffe in je einer Klasse zusammengefasst: Öl/Gas/Kohle/LPG, Biobrennstoffe, Sonnenenergie. Technologien basierend auf Geothermie, elektrischer Energie und Fernwärme werden bei der Modellierung der Wärmespeicher in Haushalten nicht berücksichtigt.

Raumwärme und Warmwasser der Single- bzw. Dual-Technologien können dabei optional in einem Warmwasserspeicher zwischengespeichert werden, bevor sie über den Prozess *Bereitstellung der Wärme X* genutzt werden. Die Wärme aus dem Heizstab kann ebenfalls zwischengespeichert werden.

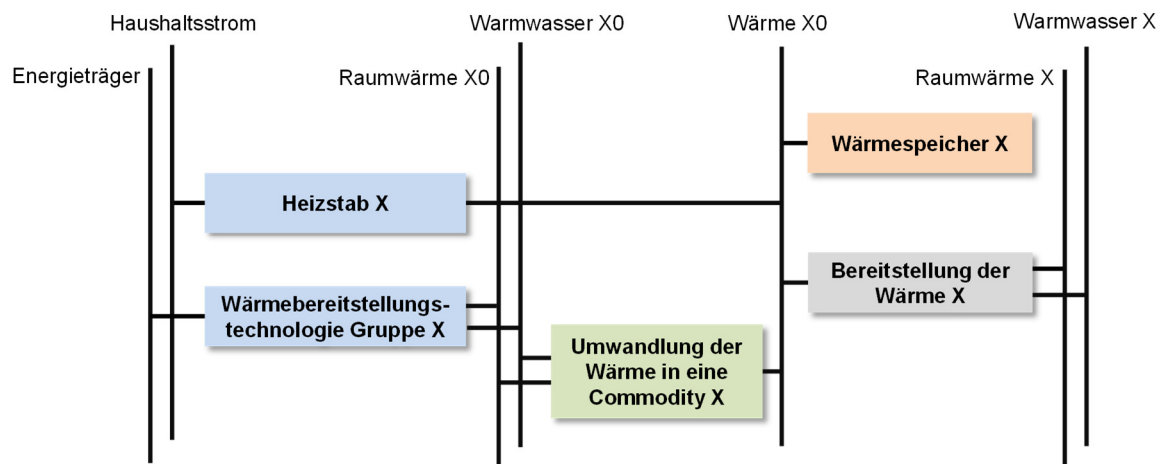


Bild 10: Modellierung von Power-to-Heat mit Wärmespeicher in Haushalten in TIMES PanEU – Deutschland

5.6 Modellierung von Nachtspeicherheizungen in Haushalten

Die elektrisch betriebene Nachtspeicherheizung wird im Deutschland Teil von TIMES PanEU für den Haushaltssektor modelliert (Bild 11). Dabei wird unterschieden zwischen Raumwärme der städtischen bzw. ländlichen Einfamilienhäuser sowie der Mehrfamilienhäuser (jeweils Alt- und Neubau).

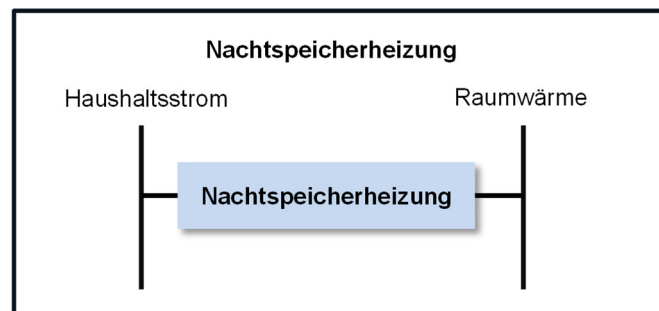


Bild 11: Modellierung von Nachtspeicherheizungen in Haushalten in TIMES PanEU – Deutschland

5.7 Modellierung von mobilen Batteriespeichern mit Vehicle-to-Grid

Der im Folgenden beschriebene mobile Batteriespeicher wird nur für den Deutschland Teil von TIMES PanEU modelliert. Zur Modellierung mobiler Batteriespeicher wird ein repräsentatives Elektroauto herangezogen, das die Verkehrsnachfrage der Pkw decken kann. Das Elektroauto basiert auf vier Prozessen: Einspeicherprozess, Batteriespeicher, Motor und Rückspeisung ins Stromnetz (Bild12). Dabei wird zwischen verschiedenen Personengruppen mit individuellen Lademustern unterschieden. Die Verfügbarkeit des Einspeicherprozesses, d. h. diejenigen Zeitsegmente, in denen die Batterie sich an einer Ladestation befindet und

aufgeladen werden kann, ergibt sich dabei aus der Ganglinie der Verkehrsnachfrage für Pkw der jeweiligen Personengruppe (also aus der Verfügbarkeit des Prozesses Motor). Hierbei wird zwischen Verfügbarkeit (Möglichkeit der Nutzung von 100 % der Kapazität) und Nicht-Verfügbarkeit (Möglichkeit der Nutzung von 0 % der Kapazität) unterschieden. Die Verfügbarkeiten von Einspeicherprozess und Motor sind dabei entgegengesetzt zueinander: Bei 100 % Verfügbarkeit des Einspeicherprozesses in einem Zeitsegment hat der Motor eine Verfügbarkeit von 0 % und umgekehrt. Der Prozess Vehicle-to-Grid, der die mögliche Rückspeisung des Stroms ins Stromnetz darstellt, besitzt in jedem Zeitsegment dieselbe Verfügbarkeit wie der Einspeicherprozess, da das Elektroauto in allen Zeitsegmenten, in denen es sich an einer Ladestation befindet, entweder geladen oder entladen (to Grid) werden kann.

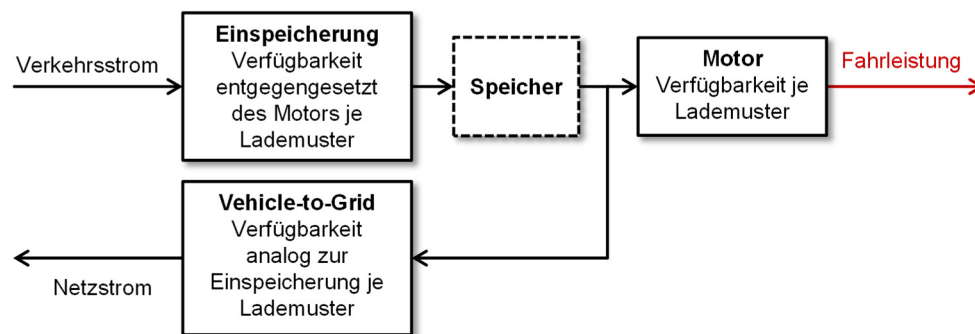


Bild 12: Modellierung der Elektromobilität in TIMES PanEU – Deutschland

5.8 Flexibilisierungsoptionen im Überblick

Ein Überblick über die verschiedenen Flexibilisierungsoptionen ist in Bild 13 dargestellt. Prozesse mit gleicher Farbe konkurrieren dabei um dieselben Energieträger.

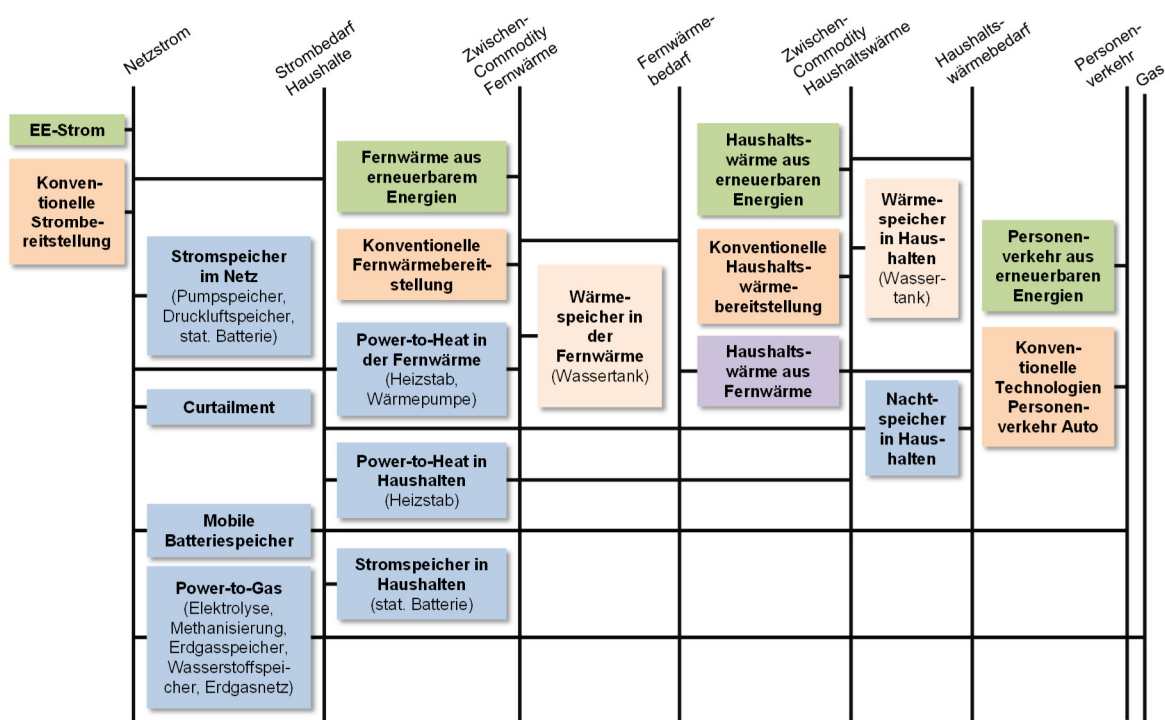


Bild 13: Flexibilisierungsoptionen im Überblick

6 Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick

Im Folgenden sollen erste exemplarische Analysen eines Energiewendeszenarios die Funktionstüchtigkeit des Modells aufzeigen. Dabei soll der optimale Mix an Energiespeichern und Power-to-X in Deutschland analysiert werden. In dem exemplarischen Szenario wird ein Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch in der EU-28 von 20 % im Jahr 2020 auf 70 % im Jahr 2050 angenommen. Als langfristiges Treibhausgasreduktionsziel in der EU-28 wird eine Minderung der Treibhausgase um 75 % bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 1990 festgesetzt. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch soll im Jahr 2050 60 % in der EU-28 und 80 % in Deutschland betragen.

In dem vorliegenden, exemplarischen Szenario sind folgende Flexibilisierungsoptionen für Deutschland zugelassen: Pumpspeicher, adiabater und diabater Druckluftspeicher in Kombination mit einer Salzkaverne, stationärer Lithium-Ionen-Batteriespeicher (für PV und Netz), Power-to-Heat mit Warmwasserspeicher in der Fernwärme, Power-to-Gas mit Salzkavernen-Gasspeichern sowie Curtailment. Die verbleibenden, oben beschriebenen Speicheroptionen werden in zukünftigen Szenarien und Sensitivitätsanalysen untersucht.

Bild 14 zeigt das Optimierungsergebnis für die Strombereitstellung nach Energieträgern in Deutschland in dem betrachteten Szenario. Die Strombereitstellung setzt sich aus der öffentlichen bzw. nicht-öffentlichen Stromerzeugung und dem Nettostromimport zusammen. Hierbei ist ein Rückgang der fossilen Stromerzeugung und ein Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu erkennen. Mit hohem Anteil erneuerbarer Energien steigt auch der Stromspeicherausbau und -einsatz zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage.

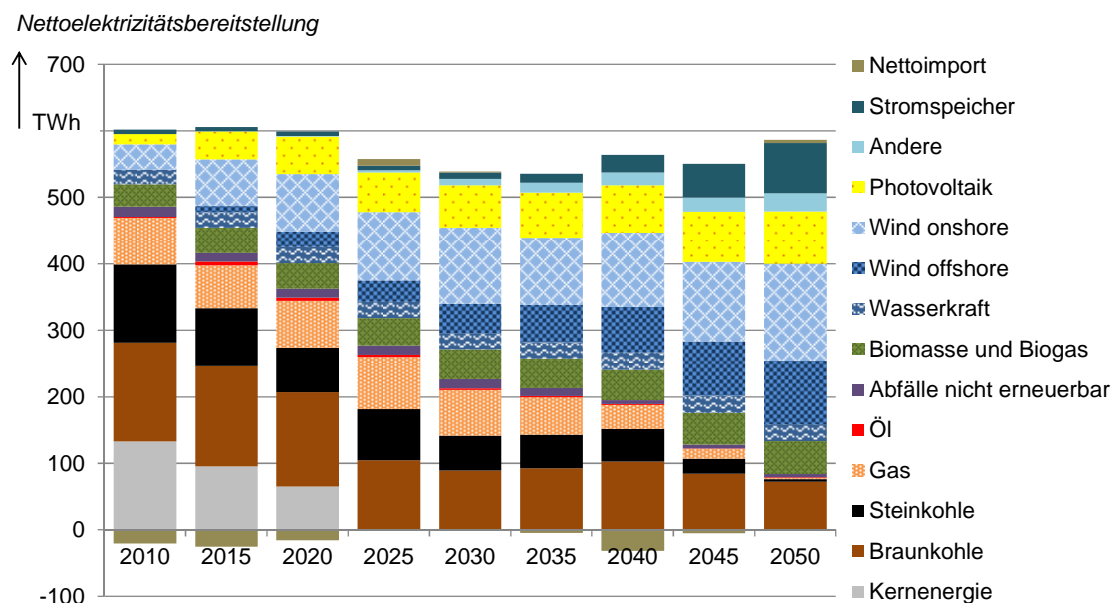


Bild 14: Strombereitstellung nach Energieträgern in Deutschland

Die installierten Kapazitäten von Stromspeichern in Deutschland sind in Bild 15 dargestellt. Hierbei wird zwischen maximalem Energieinhalt (Primärachse) und Ein- bzw. Ausspeicherleistung (Sekundärachse) unterschieden. In dem betrachteten Szenario ist ab dem Jahr 2030 ein Zubau zusätzlicher Stromspeicherkapazitäten notwendig. Hierbei wird zunächst in diabate Druckluftspeicher und in den Folgeperioden zusätzlich in Pumpspeicher und PV-Batteriespeicher investiert. Es zeigt sich, dass das Verhältnis von Speicherkapazität und Ein-

bzw. Ausspeicherleistung bei den Pumpspeichern gegenüber den Batteriespeichern vergleichsweise hoch ist. Dies liegt an den geringeren arbeitsspezifischen Investitionen bei gleichzeitig höheren leistungsspezifischen Investitionen der Pumpspeicher.

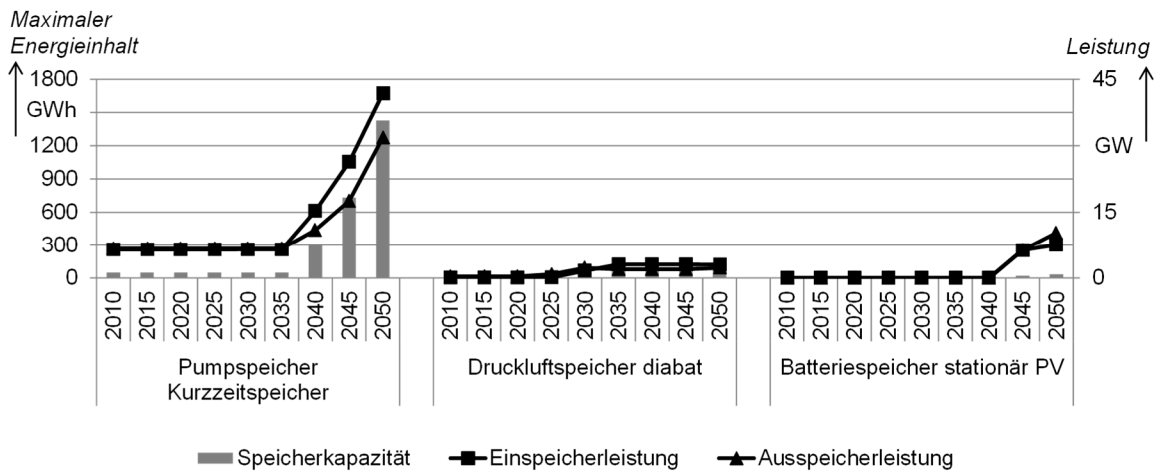


Bild 15: Installierte Kapazitäten von Stromspeichern in Deutschland

Parallel zur Kapazität der Stromspeicher werden Wärmespeicher in der Fernwärme (Bild 16, Primärachse) und Power-to-Heat (Sekundärachse) zugebaut. Im Jahr 2050 werden 13 TWh Wärme in Warmwasserspeichern gespeichert und 13 TWh Strom in Heizstäben und Großwärmepumpen genutzt. Dabei ist der Anteil der Großwärmepumpen an der Fernwärmeerzeugung trotz der geringeren installierten elektrischen Leistung höher als der Anteil der Heizstäbe. Wärmepumpen werden aufgrund der höheren Bezugsenergieeffizienz sowohl zur Grundlastreduktion als auch zur Flexibilisierung der negativen Residuallast eingesetzt, wohingegen Heizstäbe überwiegend zur Spitzenlastdeckung in der Fernwärme und zur nahezu verlustfreien Verschiebung der Elektroenergie zur Fernwärme eingesetzt werden

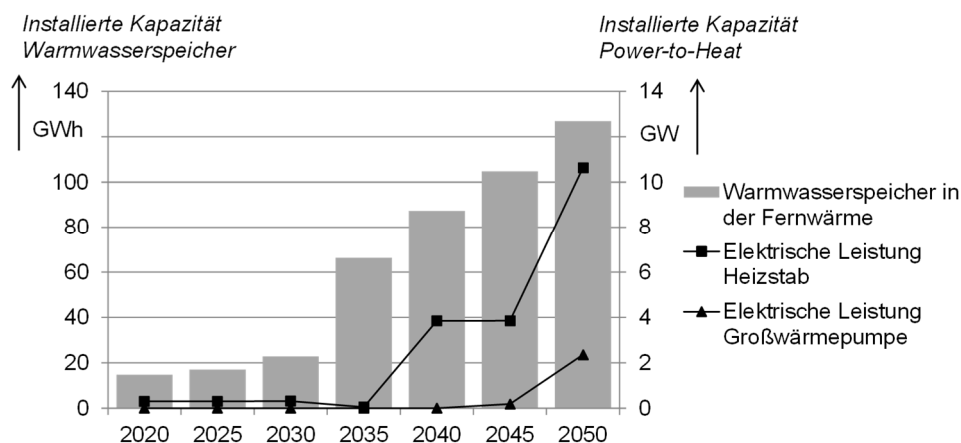


Bild 16: Installierte Kapazitäten von Power-to-Heat und Wärmespeichern in der Fernwärme

Insgesamt nimmt der Speicherbedarf in Deutschland nach dem Jahr 2035 stark zu (Bild 17), da die effektive negative Residuallast ansteigt. Die effektive negative Residuallast ergibt sich dabei aus der negativen Residuallast abzüglich des Curtailment und der Lastverschiebung in Zeitpunkten mit negativer Residuallast (links). Der Einsatz weiterer Flexibilisierungsoptionen ist im rechten Teil der Grafik dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Umbau des Energieversorgungssystems stattfindet. Die zunehmende fluktuierende Einspeisung von Strom aus Wind-

und PV-Anlagen kann bis zum Jahr 2035 durch Curtailment, veränderte Stromnachfrage, Lastverschiebung und Stromaustausch mit den Nachbarländern flexibilisiert werden. Das genutzte Potential der Flexibilisierungsmaßnahmen (ohne Stromspeicher) liegt bei insgesamt rund 40 bis 50 TWh pro Jahr. Ab dem Jahr 2035 ist ein Zubau von großen Stromspeicherkapazitäten ökonomisch sinnvoll, um die stark zunehmende Strommenge aus effektiver negativer Residuallast auszugleichen. Auch der Einsatz von Power-to-Heat steigt ab dem Jahr 2035 bei gleichzeitiger Abnahme des Curtailment. Um einen Anteil der erneuerbaren Energien von 80 % am Stromverbrauch in Deutschland zu erreichen (bzw. 70 % am Bruttoendenergieverbrauch in der EU-28), wird im Jahr 2050 weniger Curtailment eingesetzt. Diese Strommengen werden stattdessen in Stromspeichern zwischengespeichert bzw. durch Power-to-Heat in der Fernwärme genutzt. Die Vorgabe eines hohen Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch hat zur Folge, dass Biomasse vermehrt im Verkehr eingesetzt wird, wodurch das Flexibilisierungspotential der Biomasse nicht mehr im Stromsektor zur Verfügung steht. Die Ausschöpfung kostengünstiger erneuerbarer Energiepotentiale führt zu immer weiter ansteigenden Kosten für die Systemintegration der erneuerbaren Energien.

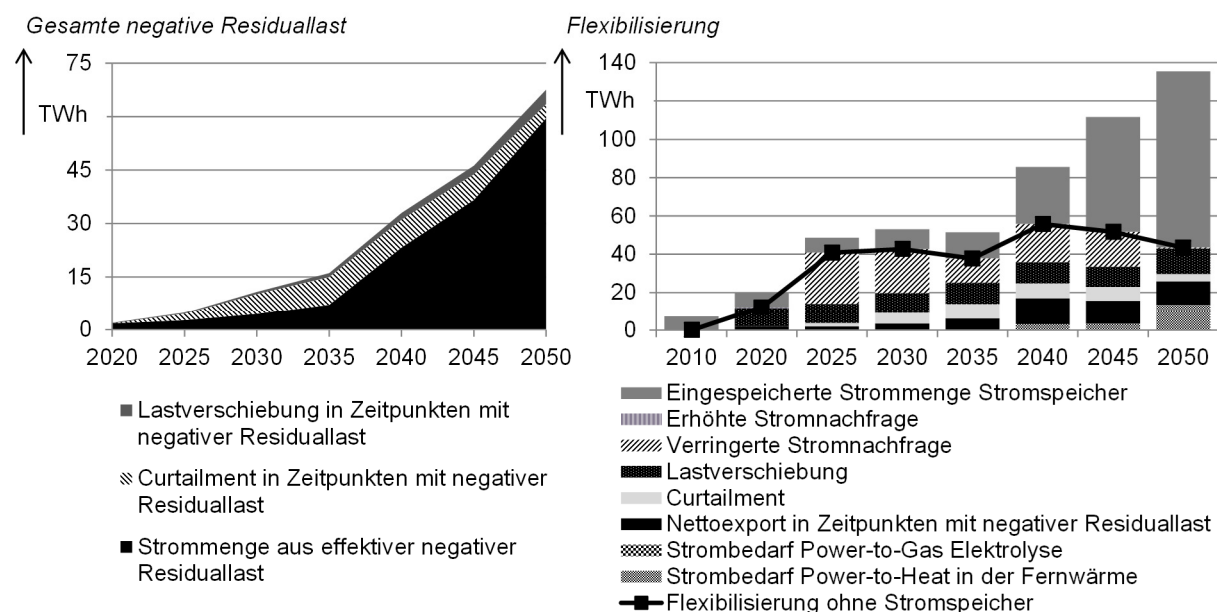


Bild 17: Einsatz der Flexibilisierungsoptionen in Deutschland

Insgesamt zeigt sich, dass weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Generierung der Nachfrage- und Einspeiseganglinien (Wind und Solar) in typtag- bzw. typwochenbasierten Energiesystemmodellen besteht, da die Wahl der Ganglinien erheblichen Einfluss auf die Residuallast und damit den Speicher- und Flexibilisierungsbedarf hat. Zukünftige Modellerweiterungen und Szenarioanalysen sollen sich darüber hinaus mit der integrierten Berücksichtigung von Elektromobilität und Nachtspeicherheizungen bzw. Power-to-Heat (mit Wärmespeichern) in Haushalten befassen. Zudem bietet es sich an, weitere Analysen bezüglich der Robustheit der Ergebnisse durchzuführen, beispielsweise über Variationen weiterer spezifischer Speicherparameter oder der Einspeiseganglinien für Wind- und PV-Anlagen. Durch die Betrachtung Deutschlands auf Basis verschiedener Typwochen ist hier zu berücksichtigen, dass die Einspeiseganglinien, die für eine typische Woche herangezogen werden, den Stromspeicherbedarf und das gesamte Optimierungsergebnis elementar beeinflussen.

Literaturverzeichnis

- [1] Remme, U.: Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell. Dissertation. Stuttgart 2006
- [2] Loulou, R.; Lehtilä, A.; Kanudia, A.; Remme, U.; Goldstein, G.: Documentation for the TIMES Model, Part II. 2005
- [3] Blesl, M.: Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas – eine Energiesystem- und Technikanalyse. Forschungsbericht Nr. 120, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Stuttgart 2014
- [4] Blesl, M.; Kober, T.; Kuder, R.; Bruchof, D.: Implications of different climate policy protection regimes for the EU-27 and its member states through 2050. Climate Policy Vol. 12, S. 301-319. 2012
- [5] Blesl, M.; Kober, T.; Bruchof, D.; Kuder, R.: Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond. Energy Policy 38 6278-6292, 2010
- [6] Welsch, J.; Blesl, M.: Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien mit dem europäischen Energiesystemmodell TIMES PanEU, VDI Optimierung in der Energiewirtschaft. November 2015
- [7] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung. Stuttgart. Juni 2014.
- [8] Agora Energiewende: Stromspeicher in der Energiewende. ef, FENES, IAEW, ISEA, Deutschland. September 2014.
- [9] Fraunhofer IWES; IAEW RWTH Aachen; Stiftung Umweltenergierecht: Roadmap Speicher - Speicherbedarf für erneuerbare Energien - Speicheralternativen - Speicheranreiz - Überwindung rechtlicher Hemmnisse. Kassel. November 2014.
- [10] Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; IFEU; Stiftung Umweltenergierecht: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. September 2015