

Mathis Buddeke, Frank Merten

Ergebnisbericht | Februar 2017

Nutzung von Wasserstoffspeichern im europäischen Stromsystem 2050

Teilbericht D16 im Rahmen des BMBF-
Aufstockungsprojektes: Regenerative Strom-
versorgung & Speicherbedarf in 2050 plus
(RESTORE2050_plus)

FKZ: 03SF0439B

Förderung durch Bundesministerium für
Bildung und Forschung (BMBF)



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde durch das BMBF gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bitte den Bericht wie folgt zitieren:

Buddeke, Mathis; Merten, Frank (2017): „Nutzung von Wasserstoffspeichern im europäischen Stromsystem 2050“; Teilbericht D16 zum Forschungsvorhaben RESTORE 2050 – Regenerative Stromversorgung & Speicherbedarf im Jahr 2050; FKZ 03Sf0439B, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Wuppertal, Feb. 2017

Projektlaufzeit: Nov. 2012 bis Sep. 2016

Projektkoordination:

Dr. Thomas Vogt
NEXT ENERGY - EWE-Forschungszentrum für Energietechnologie e. V.
an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Carl-von-Ossietzky-Str. 15
26129 Oldenburg
Tel: 0441 99906-103; Fax: 0441 99906-109
E-Mail: thomas.vogt@next-energy.de

Projektpartner:

Dr. Detlev Heinemann (Unterauftragnehmer)
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik, Abteilung EHF
Arbeitsgruppe Energiemeteorologie
Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11
D-26129 Oldenburg
Tel: 0441-798 3543; Fax: 0441-798 3326
E-Mail: detlev.heinemann@uni-oldenburg.de

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI):

Mathis Buddeke, Frank Merten mit Unterstützung durch Kamil Rodzynko

Impressum**Herausgeber**

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechpartner/-in

Dipl.-Phys. Frank Merten
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Forschungsgruppe Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
Telefon: 0202-2492-126; FAX: 0202-2492+198
frank.merten@wupperinst.org

Stand

Februar 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
2	Einsatz von H2-Speichern zur Senkung der EE-Stromüberschüsse ohne überregionalen Energieaustausch	6
2.1	Methodik: ex-post Analysen zur regionalen Nutzbarmachung von EE-Überschüssen	6
2.2	Exkurs: Einspeisecharakteristik der Erneuerbaren Energien in Deutschland. . . .	8
2.3	Regionale Auswirkungen des Einsatzes von Wasserstoffspeichern	10
2.3.1	Reduktion von EE-Stromüberschüssen und residueller Stromnachfrage . .	10
2.3.2	Auslastung der H2-Speicherpotenziale	13
2.4	Fazit	14
3	Exkurs: Direkter Wasserstofftransport von Skandinavien nach Deutschland	15
3.1	Methodik: Betrachtung von direktem H2-Austausch zwischen zwei Regionen zur Kopplung der H2-Speicherpotenziale (ex-post Analyse überregionaler Wasserstoffaustausch)	15
3.2	Wasserstoffaustausch zwischen Skandinavien und Deutschland (ex-post Analyse überregionaler Wasserstoffaustausch)	16
3.3	Fazit	18
4	Überregionaler Einsatz der H2-Speicher	19
4.1	Methodik: Nutzbarmachung von EE-Überschüssen durch H2-Speicher im europäischen Stromsystem mit überregionalem Energieaustausch - Weiterentwicklung des RESTORE2050 Optimierungsmodells	19
4.2	Auswirkungen des zusätzlichen Ausbaus von Wasserstoffspeichern auf das Gesamtsystem	20
4.2.1	Auswirkungen auf die Deckungsrate und Backup-Kapazitäten	20
4.2.2	Auswirkungen auf Speicherkapazitäten.	22
4.2.3	Auswirkungen auf das Übertragungsnetz.	25
4.3	Fazit	26
5	Exkurs: Veränderung des Wasserstoff-Speichereinsatzes bei Erhöhung des EE-Angebots	28
6	Zusammenfassung und Ausblick	31
6.1	Ergebnisse der ex-post Analysen	31
6.2	Exkurs: Wasserstoff Direktübertragung zwischen zwei Regionen (Deutschland und Skandinavien)	32
6.3	Überregionaler Einsatz der H2 Speicher	33
6.4	Exkurs: Variation der installierten EE-Kapazitäten	33
6.5	Ausblick	34

1 Einführung

Die vorangegangenen Analysen im RESTORE2050 Projekt, die im Rahmen dieses Berichts weitergeführt werden, haben gezeigt, dass der Einsatz von Wasserstoffspeichern zur Residuallastglättung nur bedingt geeignet ist. Zwar bietet die Technologie ein hohes technisches Potenzial hinsichtlich der Speicherkapazitäten und der installierbaren elektrischen Leistungen. Jedoch führt ein systemdienlicher Einsatz, bei dem positive Residuallastspitzen u.a. durch Anheben geringer Residuallasten gesenkt werden, wie er in den Modellrechnungen des RESTORE2050 Projektes implementiert ist, zu einer Absenkung der Deckungsraten von erneuerbaren Energien (EE) im europäischen Stromsystem. Dies ist dadurch begründet, dass die Umwandlung und Speicherung von EE-Strom als Wasserstoff (H₂) im Vergleich zu anderen Speichertechnologien hohe Wandlungsverluste sowohl bei der H₂-Erzeugung als auch bei der Rückverstromung aufweisen. Daher wird im Rahmen dieses Aufstockungsprojektes (RESTORE2050_plus) untersucht, welchen Beitrag alternative Einsatzstrategien der H₂-Speicher zur Minimierung der negativen Residuallast, also potenzielle erneuerbaren Stromüberschüssen, und gleichzeitig zur Erhöhung der EE-Versorgungsanteile leisten kann.

Hierzu werden mit diesem Vorhaben (RESTORE2050_plus) folgende Ansätze verfolgt:

- ex-post Analysen auf Basis der zuvor in RESTORE2050 durchgeführten Modellrechnungen und Ergebnisse
- neue, zusätzliche Modellrechnungen mit dem RESTORE2050 Optimierungsmodell, jedoch mit angepasster Einsatzstrategie

Die ex-post Analysen (Ansatz 1) beschränken sich - methodisch bedingt - zunächst auf den „lokalen“ Einsatz der Speicher zur Senkung der Energieüberschüsse und -unterdeckungen innerhalb der jeweils betrachteten Region, die sich aus einer oder mehreren Nationen zusammensetzt. Dies folgt daraus, dass für die Berechnung des Energieaustauschs über das Übertragungsnetz eine weitere Optimierung notwendig wäre. Da jedoch zunächst unklar ist, ob die Zielfunktion der Optimierung für den Einsatz der H₂-Speicher erfolgreich angepasst werden kann, wird vorerst auf die weitere Optimierung verzichtet. In den ex-post Analysen (Kapitel 2) ist gemäß den zugrunde liegenden Simulationen jedoch grundsätzlich auch der Netzaustausch zwischen den Regionen berücksichtigt. Allerdings werden Effekte oder Auswirkungen, die sich durch den nachgelagerten Einsatz der H₂-Speicher ergeben, nicht abgebildet.

Angesichts der zum Teil sehr großen potenziellen EE-Stromüberschüsse (z.B. in Skandinavien) wurde ex-post zudem untersucht, ob eventuell die Prozesskette H₂-Erzeugung in der Überschussregion und Abtransport von EE-Wasserstoff zu einer Defizitregion mittels Pipeline Vorteile gegenüber dem Stromtransport zur Defizitregion und der dortigen H₂-Erzeugung bietet.

Im zweiten Ansatz (angepasste Einsatzoptimierung in Kapitel 4) wurde darüber hinaus die Zielfunktion und das Modell angepasst, um auch alternative Einsatzstrategien überregional, d.h. mit Berücksichtigung des Stromtransportnetzes untersuchen zu können.

Auf Basis der erzielten neuen Ergebnisse wurden abschließend zusätzliche Hinweise und Empfehlungen erarbeitet, die den Bedarf und Nutzen von Wasserstoffspeicherung vor dem Hintergrund einer fast vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromversorgung in Europa aufzeigen. Zusammen mit den bereits erzielten Ergebnissen aus dem RESTORE2050 Vorhaben können so die Wasserstoffspeicher als zusätzliche Flexibilitätsoption im europäischen Stromsystem im Hinblick auf deren Implikationen und Wechselwirkungen bewertet werden.

Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen auf den Arbeiten des vorangegangenen RESTORE2050 Projektes. Daher wird hier nicht separat auf grundlegende Annahmen zu den zugrundeliegenden Energieszenarien für das Jahr 2050 eingegangen. Ferner wird in diesem Bericht die

Kenntnis über das verwendete Optimierungsmodell und die Methodik zur Ableitung der Erkenntnisse (Simulationsplan, Nomenklatur der Simulationen) vorausgesetzt, die in den entsprechenden Teilberichten (siehe Literaturverzeichnis) umfangreich dokumentiert sind.

2 Einsatz von H2-Speichern zur Senkung der EE-Stromüberschüsse ohne überregionalen Energieaustausch

In diesem ersten Teil wird eine Analyse vorgestellt, die ex-post zu den bereits bestehenden Modellrechnungen aus dem RESTORE2050 Projekt durchgeführt wurde. Hier werden die Effekte des Einsatzes von H2-Speicherpotenzialen auf die lokale (regioneninterne) Deckung der Energienachfrage abgebildet. Das Ziel ist es, die vorhandenen technischen Potenziale und deren Wirkung durch lokale Einsatzstrategien zu bewerten. Darüber hinaus bilden die Ergebnisse auch die Grundlage für eine Bewertung der Effekte durch den Einsatz des Übertragungsnetzes, welche in Kapitel 4.2.3 erläutert werden.

2.1 Methodik: ex-post Analysen zur regionalen Nutzbarmachung von EE-Überschüssen

Die ex-post Berechnungen des H2-Speichereinsatzes beruhen auf den bereits abgeschlossenen Modellrechnungen. Diese werden im RESTORE2050 Projekt durchgeführt. Es handelt sich dabei konkret um die Modellläufe, die in Tabelle 2 aufgelistet sind. In diesen Rechnungen ist der Einsatz der erneuerbaren Energien sowie von Netzkuppelstellen und bestehenden Energiespeichern in unterschiedlichen Ausbaugraden bereits berechnet. H2-Speicher finden in diesen Berechnungen jedoch noch keine Anwendung, da die gewählte Einsatzstrategie dort Nachteile für die EE-Deckungsrate nach sich zieht. Die Ergebnisse dieser Modellläufe sind dem Bericht D11 [Buddeke and Merten, 2016] zu entnehmen. Die Auswertungen und die Dokumentation der Berechnungen sind im RESTORE2050 Abschlussbericht [Vogt et al., 2016b] zu finden.

Aus diesen Berechnungen gehen Zeitreihen der Residuallast für die untersuchten 7 Regionen

Region	ID	P _{ch} [GW]	P _{dis} [GW]	C[GWh]	Typ
1	200	29,8	29,8	29.804	H2-Speicher
	440	6	6	6.019	H2-Speicher
2	230	50,8	50,8	50.753	H2-Speicher
	360	12,7	12,7	12.704	H2-Speicher
3	280	2,8	2,8	2.781	H2-Speicher
	52	38,8	38,8	38.750	H2-Speicher
4	130	56,9	56,8	56.787	H2-Speicher
5	150	3,9	3,9	3.947	H2-Speicher
6	70	3,5	3,5	3.543	H2-Speicher
	41	16,7	16,7	16.664	H2-Speicher
SUMME		221,9	221,9	221.752	

Tabelle 1: H2-Speicher in den Restore_plus Analysen. Diese werden für die ex-post Analysen in Kapitel 2 regional weiter aggregiert

Kurzbezeichnung	Langbezeichnung	Netz	Speicher	DSM
G	Basisszenario ISI	Basis	Basis	-
R	Max- Netz ISI	Maximal	Basis	-
I	Max- Speicher ISI	Basis	Max. (ohne H2)	-
H	Basisszenario EREC	Basis	Basis	-

Tabelle 2: Simulationskonfigurationen aus RESTORE2050 auf die im Rahmen der Ex-Post Analyse zurückgegriffen wurde.

Region	Kurzbezeichnung	Enthaltene Länder
1	Iberische Halbinsel	ES, PT
2	Westeuropa	FR, IT, BE, NE, LU
3	Großbritannien	UK, IE
4	Deutschland	DE
5	Skandinavien	DK, NO, SE, FI
6	Süd- und Osteuropa	BG, BA, CZ, EE, EL, HR, HU, LT, LV, ME, MK, PL, RO, RS, SI, SK
7	Alpen	CH, AT

Tabelle 3: Regionale Zuordnung der berücksichtigten Länder im Untersuchungsgebiet in den RESTORE2050 Simulationsrechnungen

(Übersicht siehe Tabelle 3) in stündlicher Auflösung hervor. Die darin enthaltenen Überschussleistungen oder Erzeugungsdefizite können durch die in den Simulationen berücksichtigten technischen Maßnahmen (verschiedene DSM- und Energiespeicher-Optionen) gemäß deren Einsatzstrategie im RESTORE2050 Modell folglich nicht mehr weiter gemindert, regional verteilt oder zeitlich flexibilisiert werden. Es ist aber zu erwarten, dass die ermittelten großen Potenziale für eine Wasserstoffspeicherung noch zu einer stärkeren Integration von EE-Strom beitragen können. Die zugehörigen technischen Potenziale zum Ausbau der H2-Speicher wurden im Rahmen der RESTORE2050 Arbeiten abgeschätzt (siehe Dokumentation AP6 [Wienholt and Kleinhaus, 2015]) und können den untersuchten Regionen zugewiesen werden. Die resultierenden Speichereinheiten in Tabelle 1 stellen alle betrachteten Wasserstoffspeicher dar. Da die Speicherpotenziale länderscharf bestimmt wurden, können durch die regionale Aggregation zu den verwendeten 7 Regionen z.T. mehrere Speichereinheiten in einer Region verortet sein.

Im Rahmen der ex-post Analysen wird daher aufbauend auf den o.g. Residuallastverläufen der potenzielle Einsatz und Zusatznutzen der lokalen H2-Speicherpotenziale untersucht. Dabei wird der Einsatz der H2-Speicher aufgrund ihrer hohen Verluste darauf beschränkt, Erzeugungsüberschüsse im Rahmen der technischen Verfügbarkeit aufzunehmen, und in Zeiten von Energiedefiziten wieder zur Verfügung zu stellen.

Die Berechnung dieses Einsatzes erfolgt auf Basis einer einfachen heuristischen Einsatzstrategie. Dabei werden die Zeitreihen (alle Rechnungen umfassen 8760 Stunden, Wetterdatenbasis 2004) chronologisch in stündlicher Auflösung durchschritten. Startend bei Füllstand 0% werden die Speichereinheiten nur zur Ladung genutzt sofern in der Region ein Überschuss herrscht. Wenn die Ladeleistung (inkl. Wandlungsverluste) der Speicher in einer Region die negative Residuallast (Überschuss) übersteigt, wird die gesamte überschüssige Energie zur H2-Erzeugung genutzt.

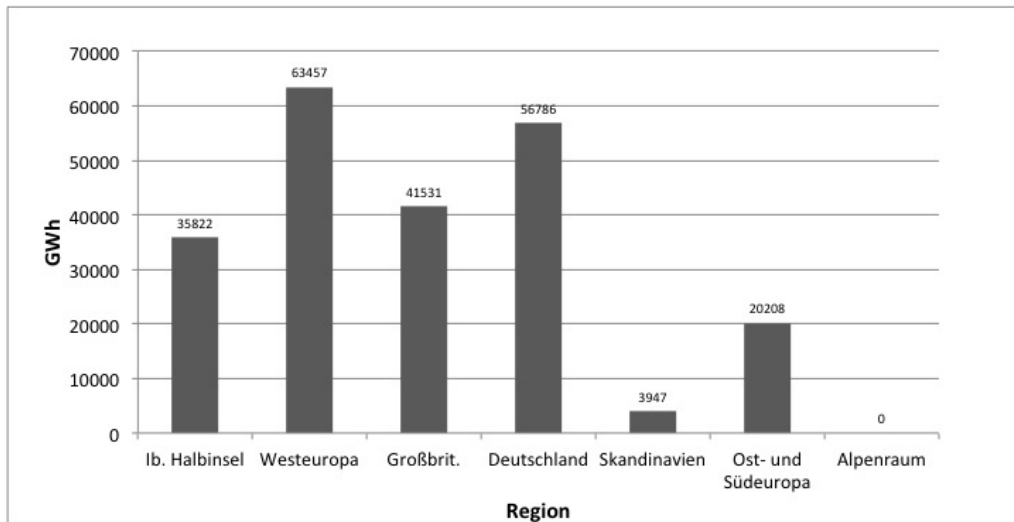


Abbildung 1: Verfügbare Speicherkapazität der Wasserstoffspeicher in den untersuchten sieben Regionen in Europa. Die elektrische Ein- und Ausspeicherleistung [GW] wird stets mit $1/1000$ der installierten Speicherkapazität [GWh_{th}] angenommen

Andernfalls wird bis zur regionenspezifischen Beladeleistung eingespeichert. Energie, die dabei durch die begrenzte Einspeicherleistung nicht genutzt werden kann, bleibt in der Region als negative Residuallast bestehen. Begrenzt sind die Einspeichervorgänge ebenfalls durch die Speicherkapazität. Da die überschüssige Energie in dieser vereinfachten Einsatzplanung lediglich nutzbar gemacht werden soll, nicht aber zu spezifischen Zwecken wie z.B. Spitzenlastminderung eingesetzt wird, kommt es beim Durchschreiten der Zeitreihe unmittelbar zu einem Ausspeichervorgang, wenn eine positive Residuallast (Unterdeckung) vorliegt und Energie im Speicher verfügbar ist. Der Wasserstoff im Speicher wird dann bis maximal zur Speicherentladeleistung zur Rückverstromung eingesetzt. Da die Residuallastzeitreihen bereits den Netzaustausch zwischen den Regionen beinhalten, ist gewährleistet, dass die H₂-Speicher als letzte Option eingesetzt werden. Etwaige Änderungen an den Austauschleistungen zwischen den Regionen durch die zusätzlichen Flexibilitätspotenziale der H₂-Speicher können durch diese Vorgehensweise nicht abgebildet und quantifiziert werden.

2.2 Exkurs: Einspeisecharakteristik der Erneuerbaren Energien in Deutschland.

Die in den verwendeten Referenzszenarien unterstellten Kapazitäten der fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie PV und Windenergie führen wetterbedingt vor allem zu kurzzeitigen bis hin zu längerfristigen (saisonalen) Schwankungen in der Energiebereitstellung. Da im RESTORE2050 Projekt eine umfangreiche Wetterdatenbasis durch die Universität Oldenburg bereitgestellt wurde, wird anhand dieser Daten exemplarisch dargestellt, welchen zeitlichen Charakter diese Schwankung in Bezug auf Minderleistung ("Dunkelflauten") haben. Anhand dieser Untersuchung können Rückschlüsse auf die Intensität und Häufigkeit dieser Ereignisse in einem Land gezogen werden. Um dies zu charakterisieren, wird die zeitgleiche Einspeisung der PV- und Windenergieanlagen auf auftretende Flauten untersucht. Die hier gezeigten Ergebnisse beruhen auf dem Datensatz [von Bremen and Heinemann, 2016] der Universität Oldenburg. Um einen Bezugswert für die Minderleistung heranziehen zu können, wird zunächst die mittlere länderspezifische Einspeisung der 10 Jahres-Datenbasis (im Folgenden: Dauereinspeisung) berechnet. Anschließend wird untersucht welche Häufigkeit sowie Dauer die auftretenden Flauten aufweisen. Als Flaute wird im

Folgendes ein Zeitraum bezeichnet, in dem die mittlere Stromerzeugung durch die betrachteten Technologien ein bestimmtes Perzentil der Dauereinspeisung nicht überschreitet.

In Abbildung 2 sind die resultierenden Flautenzeiten in Deutschland im Jahr 2050 nach Monaten für die Perzentile (5%, 10% und 20%) aufgetragen. Neben dem Mittelwert der auftretenden Flautendauern in den betrachteten 10 Jahren (2003-2012) sind auch die maximal- sowie minimal auftretenden Dauern dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich auf die lokale EE-Einspeisung gemäß ISI-Szenario. Zusätzlich ist die Anzahl der durchschnittlich jährlich auftretenden Flauten je Perzentil und Monat angegeben. In der Darstellung sind lediglich extreme Mindereinspeisungen aufgeführt. Dies gibt Anhaltspunkte darüber, in welchen Monaten verstärkt mit besonderen Wetterlagen gerechnet werden muss, die einen Einsatz von Backup Kapazitäten oder großen Speicherkapazitäten wie H₂-Speicher erforderlich machen.

Zunächst kann festgestellt werden, dass die mittlere Flautendauer grundsätzlich im Bereich der

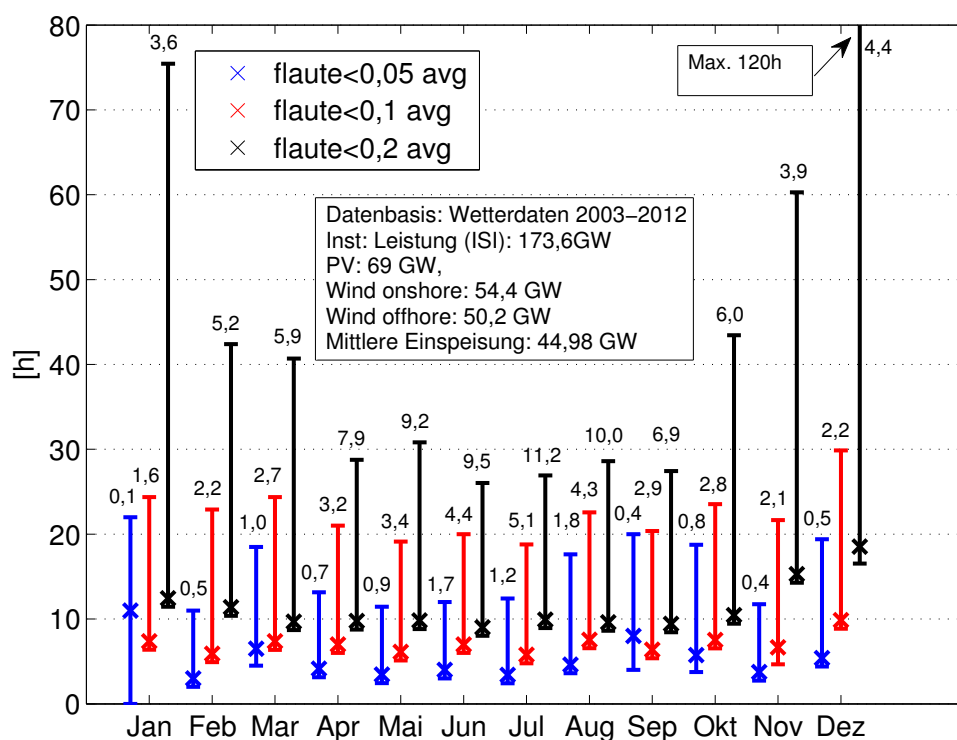


Abbildung 2: Dauer von Flauten unterschiedlicher Intensität in Bezug auf die mittlere Einspeiseleistung der Jahre 2003 bis 2012 in Deutschland. Neben dem Mittelwert „x“ sind minimal und maximal auftretende Flautendauern aufgetragen. Die Zahlen an jedem Datenpunkt stellen die mittlere jährliche Anzahl der jeweiligen Ereignisse dar.

Datenbasis: RESTORE2050_plus (Universität Oldenburg)

minimal auftretenden Dauer liegen. Dies legt nahe, dass langanhaltende Flauten in den betrachteten Perzentilen eher die Ausnahme darstellen. Die mittlere Flautendauer aller drei Perzentile beträgt in den meisten Monaten etwa 10h. Der Grund dafür ist, dass die Solareinspeisung einer starken tageszeitlichen Schwankung unterliegt und nachts stets vollständig einbricht. Daher entstehen vor allem in Zeiten der Dunkelheit prägnante Mindererzeugungen, die sich stark in den mittleren Flautenzeiten widerspiegeln. Des Weiteren ist dem Diagramm zu entnehmen, dass die Anzahl der starken Flauten im Sommer ansteigt, deren Dauer im Vergleich zu den Wintermonaten jedoch abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass vor allem in dieser Zeit auch die Einspeisung der Windenergie häufiger stark abfällt.

Für die Energiespeicher deuten die Ergebnisse auf einen ganzjährigen Einsatz hin, der im Win-

ter eher zu langanhaltenden Flauten und damit größeren notwendigen Speicherkapazitäten führt. Im Sommer hingegen sind die Flauten eher kurzweilig und treten häufiger auf. Im Bereich der Leistung zeigt sich, dass ganzjährig mit starken Flauten zu rechnen ist. Die notwendige Speicherleistung für den Ausgleich dieser Flauten orientiert sich an der Nachfrage sowie den vorhandenen Im- und Exportkapazitäten, welche hier nicht berücksichtigt sind. Kapitel 4 enthält Ergebnisse des Zusammenspiels aus Nachfrage, Einspeisung, und Einsatz der Speicher sowie des Übertragungsnetzes.

2.3 Regionale Auswirkungen des Einsatzes von Wasserstoffspeichern

Im Rahmen dieser Analyse werden die regionalen Wasserstoffspeicher genutzt, um regionale Stromüberschüsse in Form von Wasserstoff zu speichern und in Zeiten positiver Residuallast durch Rückverstromung nutzbar zu machen. In Abbildung 1 sind die regionalen Wasserstoffspei-

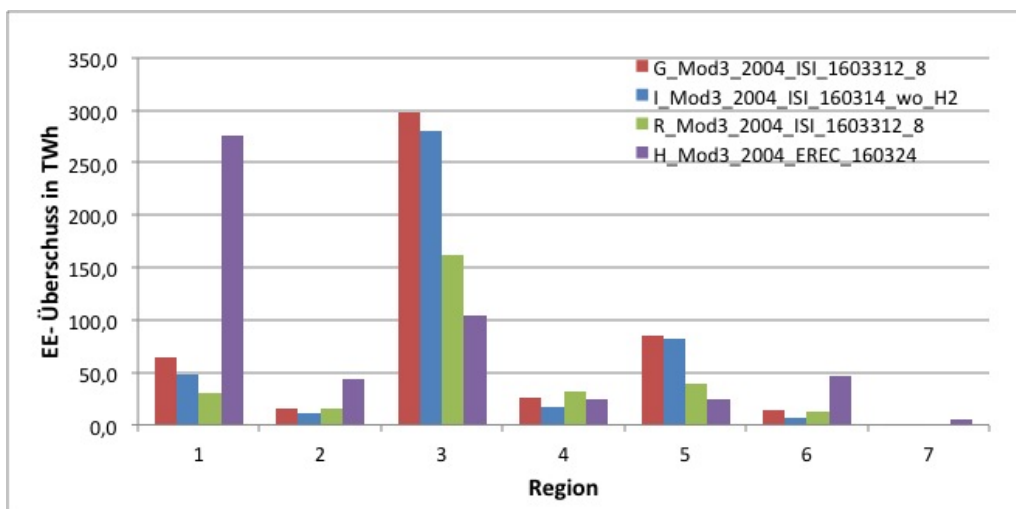


Abbildung 3: Summe der EE-Stromüberschüsse im Jahr 2050 in den untersuchten Regionen nach Einsatz von Flexibilitätsoptionen (jedoch ohne H₂-Speicher).

Datenbasis: Ergebnisse der Simulationsläufe G, R, I und H aus dem RESTORE2050 Projekt

cherpotenziale vergleichend dargestellt. Die installierte Leistung der Wandlungskapazitäten (Be- und Entladeleistung) beträgt nach den Annahmen in der Potenzialstudie jeweils 1/1000 der installierten Speicherkapazität (vgl. [Wienholt and Kleinhans, 2015]). Folglich sind in Deutschland mit 56,8 TWh Speicherkapazität etwa 56,8 GW an Be- und Entladeleistung für den Wasserstoffspeicher berücksichtigt. Die Speicherpotenziale sind sehr ungleich über die betrachteten europäischen Regionen verteilt. Hierbei fällt auf, dass insbesondere für Skandinavien und den Alpenraum geringe technische Potenziale ausgewiesen werden. Gleichzeitig zeigt sich aus den zugrunde gelegten Berechnungen aus RESTORE2050 G (Basisszenario ISI), R (Maximaler Netzausbau), I (Maximaler Speicherausbau) und H (Basisszenario GP/EREC), dass vor allem in Großbritannien, Skandinavien und auf der Iberischen Halbinsel sehr große EE-Überschüsse auftreten.

2.3.1 Reduktion von EE-Stromüberschüssen und residueller Stromnachfrage

Sowohl die EE-Stromüberschüsse als auch die verbleibende Stromnachfrage, die aus den RESTORE2050 Simulationen hervorgehen, sind sehr ungleich über Europa verteilt. Die Abbildungen 3 und 4 stellen die Mengen der überschüssigen Energie bzw. der verbleibenden Nachfrage vor Einsatz der H₂-Speicher für die berücksichtigten Simulationsläufe vergleichend dar.

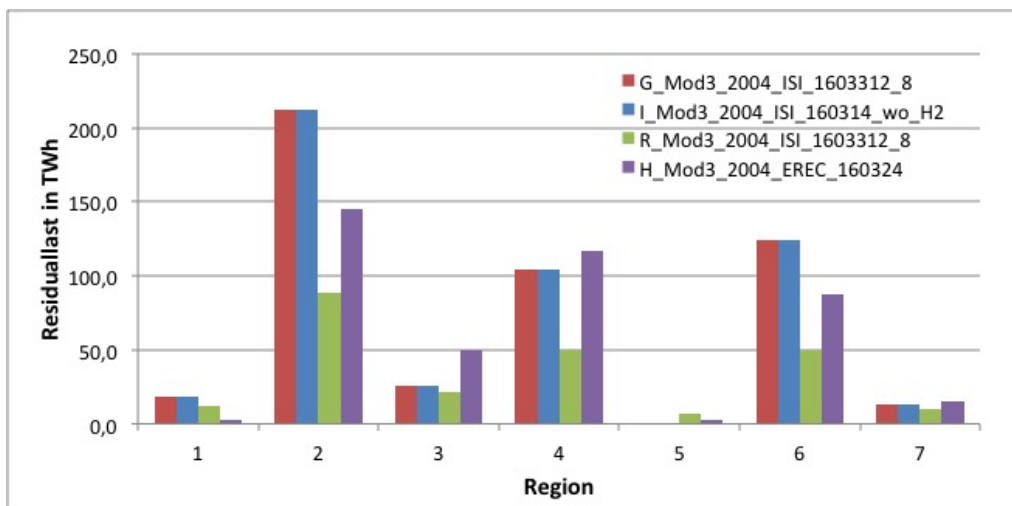


Abbildung 4: Summe der positiven Residuallast im Jahr 2050 in den untersuchten Regionen nach Einsatz von Flexibilitätsoptionen (jedoch ohne H₂-Speicher).

Datenbasis: Ergebnisse der Simulationläufe G, R, I und H aus dem RESTORE2050 Projekt

Wirkung auf die EE-Erzeugungsüberschüsse Szenariobedingt konzentrieren sich die Überschüsse auf die Regionen mit verstärktem Windenergie- bzw. Solarenergieausbau. Vor allem in den Simulationen, die auf dem ISI-Szenario basieren (G, I und R) sind starke Überschüsse in Region 3 (UK/IE) sowie in Region 5 (Skandinavien) zu verzeichnen. In dem stark solardominierten Szenario nach GP/EREC (H) hingegen treten auch in Spanien und Portugal (Region 1) große Energieüberschüsse auf (vgl. Abbildung 4). In Deutschland spielt der Einfluss der Szenarien eine untergeordnete Rolle. In Europa insgesamt treten im Basisszenario ISI (G) rund 504 TWh an Stromüberschüssen auf, wovon 76% auf die Regionen 3 (297 TWh) und 5 (85 TWh) entfallen. Wie bereits im Rahmen des RESTORE2050 Projektes festgestellt, wirkt sich der Netzausbau drastisch auf die Reduktion der Überschüsse auf. So resultieren aus der Max-Netz Simulation (R) europaweit lediglich 294 TWh an Energieüberschüssen.

Die Ergebnisse der ex-post Analysen zeigen, dass die überschüssige Energie durch den Einsatz der H₂-Speicher lediglich in den Regionen vollständig aufgenommen werden kann, deren EE-Kapazitäten nicht weit über die regioneninterne Nachfrage hinausgehen (Regionen 1 (nur ISI), 2, 4 und 6). Aus Abbildung 7 wird deutlich, dass die H₂-Speicher in den Regionen 1 (nur GP/EREC), 3 und 5, in denen EE-Überschüsse hauptsächlich auftreten, nicht ausreichen, um diese vollständig aufzunehmen. Durch die rein regionale Nutzung entfallen im ISI Szenario (Simulation G) daher 76% der Stromüberschüsse auf lediglich 27% des europäischen Kavernenpotenzials. Im Verhältnis zu den hohen Überschussleistungen sind die Speicher in diesen Regionen sowohl in Bezug auf die unterstellte Beladeleistung als auch auf die identifizierten Kavernenpotenziale begrenzt. In jeder der drei Regionen zeigt sich, dass der Füllstand vom Jahresbeginn an stetig ansteigt und die volle Speicherkapazität ausgenutzt wird. Bevor diese erreicht wird, arbeiten die Speicher oft an der Grenze der Beladeleistung. Abbildung 5 macht dies am Beispiel des Wasserstoffspeichers in Skandinavien deutlich. Das frühe „Volllaufen“ des H₂-Speichers dort liegt allerdings maßgeblich daran, dass es keine zusätzliche Option für den Export des zwischengespeicherten Stroms gibt. Dagegen werden die Speicherkapazitäten in den Nachfrageregionen (2, 4 und 6) nur geringfügig ausgenutzt (vgl. Abb. 7). Szenariounabhängig werden die verfügbaren Speicherkapazitäten hier nur im einstelligen Prozentbereich ausgelastet. Insgesamt kommt es dadurch lediglich zu einer Nutzung von ca. 50% der europaweiten EE-Überschüsse für die Wasserstoffherzeugung in den Berechnungen mit Basis-Netzausbau, obwohl große Speicherkapazitäten nahezu ungenutzt bleiben. Es ist daher festzuhalten, dass ein ausschließlich regionaler Einsatz der H₂-Speicher aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Verteilung von Kavernenpotenzial und Erzeugungs-

schwerpunkten nur eingeschränkt sinnvoll ist.

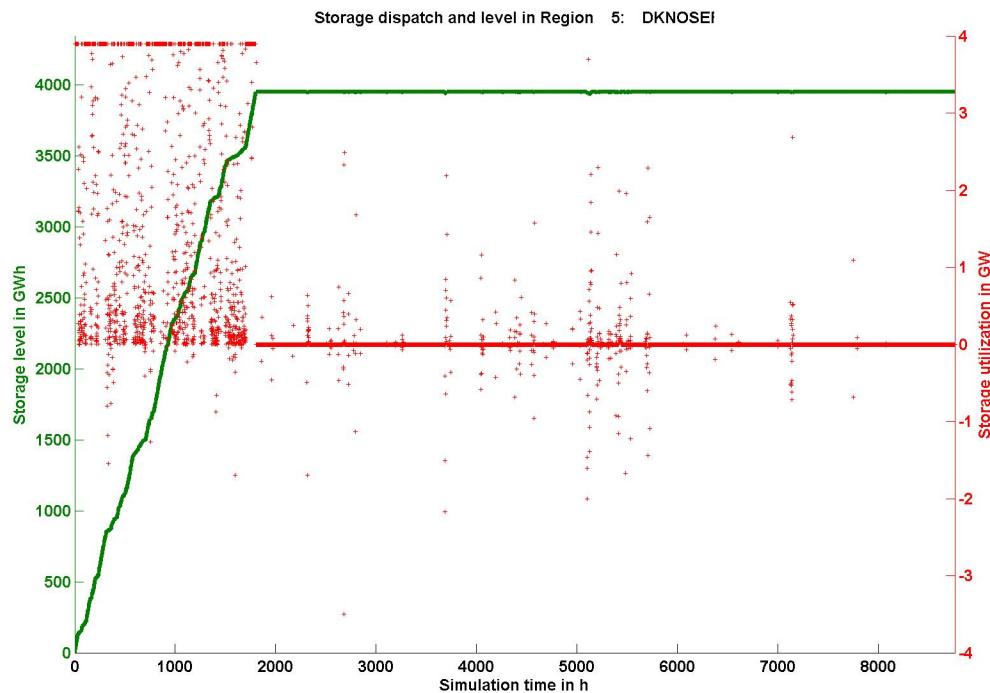


Abbildung 5: Zeitlich aufgelöster Einsatz des Wasserstoffspeichers in der Region Skandinavien gemäß Ex- Post analyse auf Basis der Berechnung G
 Datenbasis: ex-post Analysen RESTORE2050_plus

Wirkung auf die residuale Stromnachfrage Die verbleibende Stromnachfrage konzentriert sich auf die Regionen 2 (Westeuropa), 4 (Deutschland) und 6 (Osteuropa) mit einem Anteil von 88% an der Gesamtnachfrage. Diese liegt mit 497 TWh (G) etwa in der gleichen Größenordnung wie die EE-Erzeugungsüberschüsse. Bei unterstelltem maximalen Netzausbau (R) beträgt die verbleibende Nachfrage europaweit lediglich noch 239 TWh. Die verbleibende Nachfrage wird somit durch den Netzausbau stärker reduziert als die potenziellen Überschüsse (294 TWh, s.o.).

Durch den regionalen Einsatz der H₂-Speicher im Basiszenario G kommt es zu einer Senkung der verbleibenden Stromnachfrage um 65 TWh auf 432 TWh im Gesamtsystem. Die größte absolute Senkung der Residuallast entfällt dabei auf die Regionen Spanien/Portugal und Großbritannien mit 13 bzw. 19 TWh, womit die vergleichsweise geringen Residuallasten in diesen Regionen nahezu vollständig abgebaut werden können (vgl. Abbildung 6). In den Regionen mit großer verbleibender Energienachfrage (2, 4, und 6) können demnach nur relativ kleine Anteile (5-10 TWh) der residualen Nachfrage gedeckt werden. Dabei ist zu beachten, dass gleichzeitig weite Teile der H₂-Speicherpotenziale ungenutzt bleiben.

Die Ergebnisse auf Basis der Max-Netz (R) Berechnungen zeigen vergleichbare Verhältnisse und Effekte jedoch mit geringeren Energiemengen. Die gesamte residuale Energienachfrage nach ex-post Einsatz der H₂-Speicher beträgt hier noch 116 TWh, wobei etwa 55% auf die Regionen West- und Osteuropa entfallen. Die relative und absolute Abnahme der Residuallasten ist hier deutlich größer, da durch den bereits berücksichtigten Netzaustausch die Überschüsse gleichmäßiger auf alle Regionen verteilt sind.

In den Überschussregionen (1, 3 und 5) kann sowohl mit als auch ohne Netzausbau die gesamte Residuallast durch den Einsatz der H₂-Speicher aus den regionalen Überschüssen gedeckt werden. In Deutschland kann nur ein vergleichbar geringer Teil der Residuallast gedeckt werden.

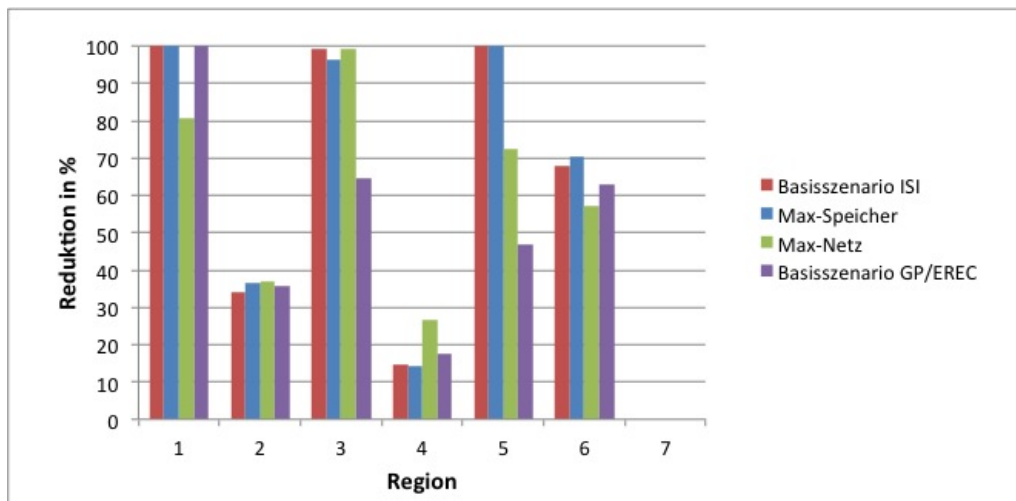


Abbildung 6: Relative Deckung der Residuallast durch den ex-post Einsatz der H2-Speicher
Datenbasis: ex-post Analysen RESTORE2050_plus

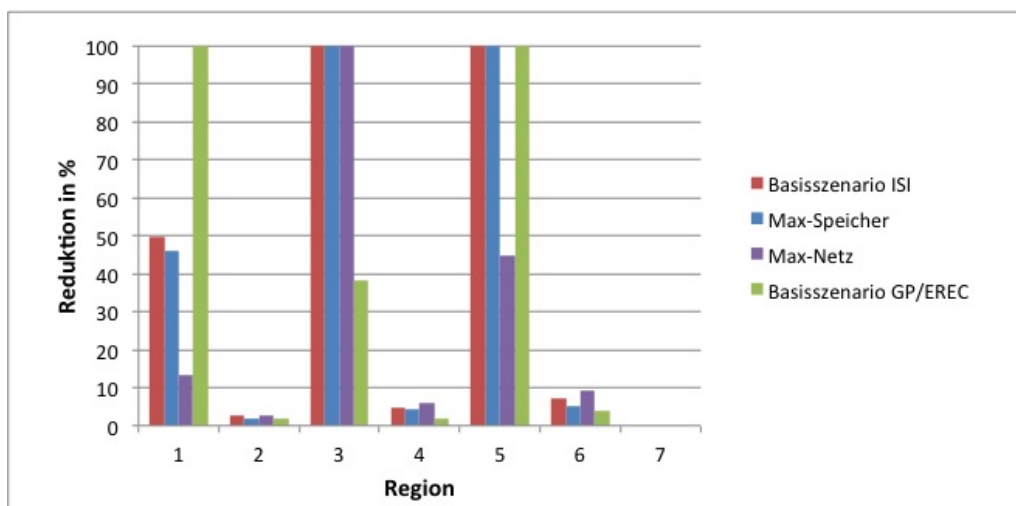


Abbildung 7: Relative Ausnutzung der regionalen Speicherkapazität.
Datenbasis: ex-post Analysen RESTORE2050_plus

Dies hängt hauptsächlich mit der geringen Verfügbarkeit von Überschüssen zusammen, die innerhalb der Region bestehen.

Insgesamt bleibt auch in Bezug auf die Residuallasten festzuhalten, dass regional beschränkte Lösungsansätze die verfügbaren Speicherkapazitäten nicht optimal auslasten und dass Stromüberschüsse den Wandlungskapazitäten nicht in vollem Umfang zugeführt werden können.

2.3.2 Auslastung der H2-Speicherpotenziale

Die H2-Speicherkapazitäten werden nur in den Regionen „gut“ ausgelastet, in denen auch große EE-Überschüsse entstehen. Dabei unterscheiden sich die Regionen stark in Bezug auf die nutzbar gemachte Energie durch die Speicher. Wo in den Regionen ES/PT (1) und UK/IE (3) hauptsächlich stark fluktuierende EE wie Solar- und Windenergie zu den Überschüssen führen, gibt es sowohl Zeiten mit starken Überschussleistungen als auch zahlreiche Perioden, in denen die EE-Erzeugung nur einen Bruchteil der installierten Kapazität beträgt. Dadurch können die Wasserstoffspeicher gut eingebunden werden, um die Zeiträume geringer Erzeugung auszugleichen. In Abbildung 7 ist die relative Ausnutzung der H2-Speicherkapazitäten für alle Regionen dargestellt.

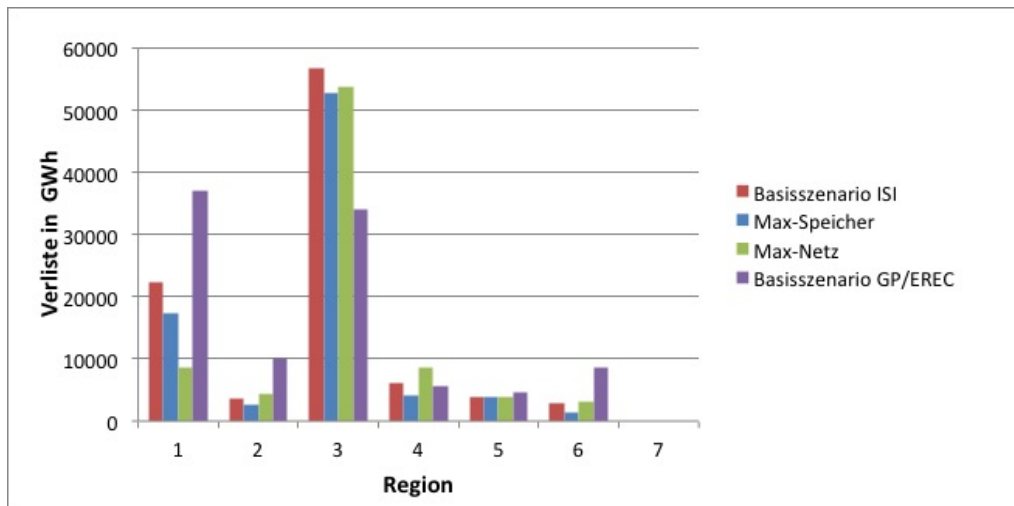


Abbildung 8: Energieverluste durch Ein- und Ausspeichervorgänge in den untersuchten Regionen

Datenbasis: ex-post Analysen RESTORE2050_plus

Die Charakteristik der EE-Einspeisung in Skandinavien (Region 5) unterscheidet sich deutlich von der in den Regionen 1 und 3. Hier ist ein weitgehend stetiger Energieüberschuss durch die kontinuierliche Wasserkrafterzeugung zu beobachten. Daher kommt es seltener zu substantziellen Residuallasten in der Größenordnung der gesamten Energienachfrage. In dieser Region wird der Speicher folglich kaum entleert und verbleibt nach initialer Füllung weitgehend ungenutzt, da die Option eines zusätzlichen Stromexports im Fall der ex-post Analysen nicht möglich ist. Aus den vorangegangenen Berechnungen mit dem RESTORE2050 Modell zeigt sich bereits, dass mit unterstelltem Basisnetzausbau bereits alle Kuppelstellen der Region 5 zu angrenzenden Regionen stark ausgelastet sind. Dies lässt sich auch daran erkennen, dass der Speicher in Region 5 trotz der vollen Auslastung der Speicherkapazität nur geringe Energieverluste produziert (vgl. Abb. 8). Der H₂-Speichereinsatz in Skandinavien ist folglich nur sinnvoll, wenn entweder eine weitaus stärkere stromnetzseitige Anbindung an die benachbarten Regionen realisiert wird, oder wenn der erzeugte Wasserstoff der Nutzung in anderen Regionen zugeführt werden kann.

2.4 Fazit

Die ex-post Analysen zeigen, dass der regionale Einsatz der H₂-Speicher zur Minderung der EE-Abregelung allein kein geeignetes Mittel ist, um die auftretenden EE-Überschüsse europaweit sinnvoll zu flexibilisieren. Es bedarf zwingendermaßen einer Möglichkeit, die großen Stromüberschüsse auch überregional zu transportieren, da die größten Speicherpotenziale (Region 2 und 4) mit Ausnahme derer in Region 3 (UK/IE) nicht in den Überschussregionen liegen und durch die regionalen Potenziale nicht ausgenutzt werden können.

3 Exkurs: Direkter Wasserstofftransport von Skandinavien nach Deutschland

In den vorigen ex-post Analysen (siehe Kapitel 2.3) zeigte sich, dass in einigen Regionen (insb. Skandinavien und GB), trotz des Einsatzes der lokalen H₂-Speicher weiterhin große Mengen an überschüssigem Strom auftreten. Zeitgleich werden in anderen Regionen (z.B. Deutschland) die Speicherpotenziale nur sehr geringfügig ausgelastet. Eine überregionale Flexibilisierung ist daher notwendig, um die Überschüsse überhaupt nutzbar zu machen. In Kapitel 4 wird daher untersucht, welche Energiemengen sich in Form von Strom überregional verteilen und damit den europaweiten Speicherpotenzialen zuführen lassen. Hierfür wird der maximale Stromnetzausbau unterstellt und der Einsatz aller Systemkomponenten im RESTORE2050 Optimierungsmodell geplant.

Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die Umsetzung von Kuppelleitungen zwischen den Regionen (z.B. Deutschland-Skandinavien) in der Größenordnung der maximalen Überschussleistungen (in Skandinavien ca. 55 GW) nicht unbedingt sinnvoll ist und nur schwer zu realisieren sein könnte. Dabei werden nicht nur die technisch-ökonomischen Herausforderungen, sondern (wie beim heutigen Netzausbau bereits zu beobachten ist) insbesondere auch die vielfältigen nicht-technischen Hemmnisse eine gewichtige Rolle spielen. Daher soll im Rahmen dieses Exkurses zusätzlich untersucht werden, welchen Beitrag alternativ eine Wasserstoff-Pipeline zwischen den Regionen Deutschland (4) und Skandinavien (5) leisten kann. Der Hintergrund dafür ist, dass die energetische Übertragungsleistung von Gasleitungen im Vergleich zu Stromleitungen deutlich höher ist.

3.1 Methodik: Betrachtung von direktem H₂-Austausch zwischen zwei Regionen zur Kopplung der H₂-Speicherpotenziale (ex-post Analyse überregionaler Wasserstoffaustausch)

Die hier vorgenommene vereinfachte Berechnung des direkten Wasserstoffaustauschs zwischen zwei Regionen dient der groben Abschätzung von notwendigen Übertragungsleistungen. Sie soll einen Eindruck vermitteln, welchen Effekt ein alternativer Lösungsansatz bietet, sollte ein Ausbau des Stromnetzes in Europa über aktuelle Planungen hinaus nicht oder nur eingeschränkt stattfinden können. Es wird davon ausgegangen, dass in der Region der Überschüsse ausreichend H₂-Erzeugungskapazitäten zur Verfügung stehen, um die Überschussleistungen in vollem Umfang aufzunehmen. Ebenfalls wird unterstellt, dass lokale Speicherkapazitäten auch dazu genutzt werden können, um einen gleichmäßigen Abtransport des erzeugten Wasserstoffs durch die Pipeline zu gewährleisten (Pufferfunktion).

Dazu werden die folgenden Annahmen getroffen, die ein stark vereinfachtes Abbild der möglichen Lösungen darstellen. Zum einen werden alle verwendeten Komponenten zur Wasserstoffübertragung (wie beim Stromnetz auch) als verlustfrei angesehen. Zudem wird der Energieaufwand für den Betrieb der Pipelines nicht mit abgebildet. Ferner wird unterstellt, dass die Übertragung von Wasserstoff lediglich von der Überschussregion hin zur Nachfrageregion stattfindet, nicht aber in umgekehrter Richtung. Die Berechnung erfolgt mit der gleichen Methodik, wie bei der zuvor beschriebenen ex-post Analyse. Die H₂-Erzeugungsleistung wird dabei jedoch nicht auf die lokalen Speicherpotenziale (Beladeleistung) begrenzt, sondern aus der Residuallastzeitreihe berechnet. Die resultierende Einsatzplanung kann daher nun alle Überschüsse aufnehmen und mit $P_{H_2,i}$ in Wasserstoff wandeln. Hierbei wird der Wirkungsgrad der H₂-Erzeugung nach [Wienholt and Kleinhaus, 2015] mit $\eta_{H_2} = 0,63$ angenommen. Um den Anteil des Wasserstoffs zu bestimmen, der für den Export genutzt werden kann, wird unterstellt, dass die ursprüngliche Beladeleistung ($P_{\text{Speicher,max}}$) entsprechend der identifizierten Potenziale stets weiterhin für die lokale

Speicherbeladung genutzt wird. Jede Erzeugungsleistung, die über die ursprüngliche Speicherbeladeleistung hinausgeht, wird nun dem H2-Export zugeschrieben ($P_{H2,Export}$). Wenn der lokale Speicher voll ist (es wird angenommen, dass er zur Erhöhung der lokalen Versorgungssicherheit stets bestmöglich gefüllt ist), werden auch Leistungen unterhalb der Beladeleistung für den Export bereitgestellt. Daraus ergibt sich über das Jahr eine H2-Einspeisezeitreihe für den Export mittels Pipeline nach Deutschland und in Überschusssituationen die Beladeleistung der Speicher sowie die H2-Exportleistung wie folgt:

$$\left. \begin{array}{l} P_{Speicher,i} = P_{H2,i} \\ P_{H2,Export,i} = 0 \end{array} \right\} \quad \text{für alle } P_{H2,Export,i} \leq P_{Speicher,max} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{Speicher,i} = P_{Speicher,max} \\ P_{H2,Export,i} = P_{H2,i} - P_{Speicher,max} \end{array} \right\} \quad \text{für alle } P_{H2,Export,i} > P_{Speicher,max} \quad (2)$$

Dabei stellt $P_{H2,i}$ die gesamte H2-Erzeugungsleistung der Stunde i dar. Erfolgt die Berechnung der H2-Exportleistung in einer (Erzeuger-)Region, wird ein erneuter Durchlauf der Speichereinsatzplanung durchgeführt. In diesem Durchlauf wird der ermittelte zeitliche Verlauf der H2-Exportleistung in der (Empfänger-)Region als Speicherzufluss berücksichtigt. Soll also z.B. eine Pipeline zwischen Skandinavien und Deutschland simuliert werden, werden die Exportleistungen in Skandinavien bestimmt und im deutschen H2-Speicher als zusätzlicher Zufluss bereitgestellt. Dies kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- Die H2-Exportleistungen werden in ihrer zeitlichen Charakteristik und voller Höhe in der Empfängerregion bereitgestellt.
- Nach der Berechnung der H2-Exportmengen wird die durchschnittliche H2-Exportleistung berechnet und entsprechend in der Empfängerregion in Form eines stetigen Zuflusses in den H2-Speicher berücksichtigt.

Die 2. Variante unterstellt, dass der Wasserstoff in der Erzeugerregion zunächst im lokalen Speicher zwischengespeichert werden kann, um dann als konstanter Exportstrom exportiert zu werden. Auf diese Weise lässt sich die minimal nötige Übertragungskapazität der Pipeline abschätzen. Allerdings setzt dies eine H2-Erzeugung aus Stromüberschüssen voraus, die gleichmäßig über das Jahr verteilt ist und keine starken saisonalen Differenzen aufweist.

3.2 Wasserstoffaustausch zwischen Skandinavien und Deutschland (ex-post Analyse überregionaler Wasserstoffaustausch)

Im Rahmen dieser Analyse wird untersucht, welchen Effekt eine Wasserstoffdirektübertragung zwischen Skandinavien und Deutschland auf die regionalen Residuallasten sowie auf die Auslastung der vorhandenen Speicherkapazitäten hat. Dies ist insofern interessant, als dass durch vorangegangene Arbeiten identifiziert wurde, dass eine Nutzung der skandinavischen Energieüberschüsse im europäischen Raum notwendig ist, um hohe EE-Deckungsraten ($\gg 90\%$) zu erzielen. Gleichzeitig sind die EE-Überschussleistungen in Skandinavien so groß (bis 58 GW_{el} in Simulation G), dass eine (verlustarme) Direktübertragung von Strom ohne Zwischenspeicherung zu einem Bedarf an sehr großen Netzkuppelleistungen führt, die technisch und ökonomisch sowie gesellschaftlich nur schwer darstellbar sind. Da sich lokale Wasserstoffspeicher als Pufferspeicher für den H2-Export anbieten, kann ggf. eine zeitliche Flexibilisierung zu verminderten Anforderungen an die Infrastruktur und ihren Ausbau führen.

Deutschland als Empfängerregion wird dabei lediglich als Beispielloption verstanden, um die Potenziale der Wasserstoffübertragung darzustellen. Es bietet sich jedoch durch den verbleibenden

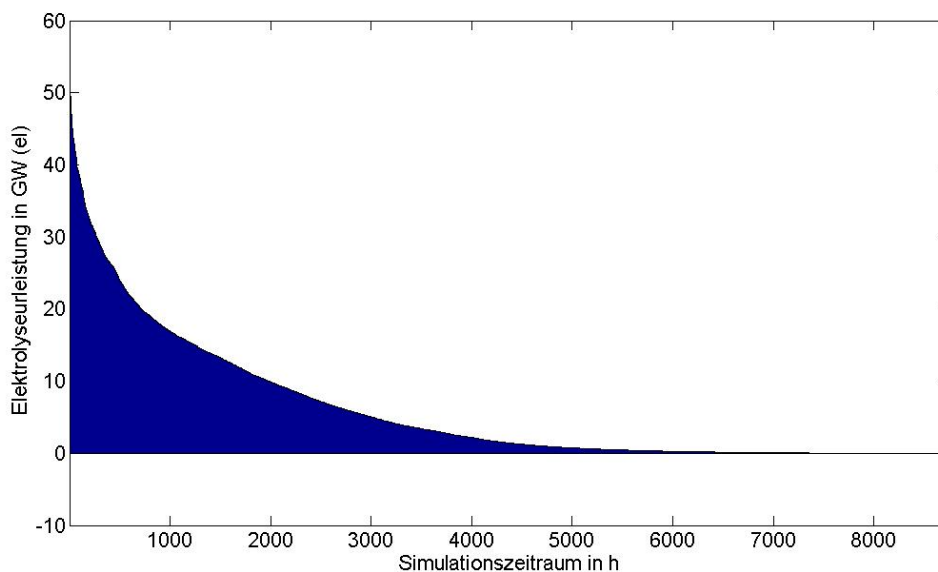


Abbildung 9: Jahresdauerlinie der Elektrolyseurleistung für den H₂-Export in Skandinavien.

Datenbasis: ex-post Analysen RESTORE2050_plus

Energiebedarf nach EE-Einspeisung, die großen regionalen Kavernenpotenziale, die regionale Nähe zu Skandinavien sowie die bereits bestehenden großen Gastransportinfrastrukturen im Norden des Landes für eine Beispielanalyse an. Die Analyse beschränkt sich jedoch auf den reinen Energieaustausch und die Speichernutzung zwischen den Regionen und beleuchtet weder die technische noch die ökonomische Machbarkeit der Option.

Die Berechnung wird zunächst auf Basis der Simulation G (Basiszenario ISI) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass in Skandinavien erhebliche Mengen an Wasserstoff aus den überschüssigen Strommengen generiert werden können. Vorausgesetzt, dass jeglicher Wasserstoff, der in den regionalen Speicherkapazitäten gespeichert werden kann, als Energiereserve für die Region selbst vorgehalten wird, können darüber hinaus noch 52 TWh_{th} für den Export erzeugt werden. Dabei werden Erzeugungsleistungen von bis zu 58 GW_{el} eingesetzt. Die vereinfachte Wasserstoffherzeugung arbeitet in dem simulierten Jahr in insgesamt 7962 Stunden (nahezu vollständig im Teillastbetrieb). In Abbildung 9 ist die Jahresdauerlinie der Elektrolyseurleistung dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die maximalen Leistungen lediglich in wenigen Stunden im Jahr auftreten. Das 99% Quantil der Jahresdauerlinie liegt bereits bei 39 GW, das 90% Quantil bei 18,18 GW. Die mittlere stündliche Erzeugungsleistung liegt bei 6 GW¹. Unter der Annahme, dass die Wasserstoffspeicher in Skandinavien als Pufferspeicher dienen, können diese 6 GW als überschlägige Übertragungsleistung der Pipeline angesetzt werden. Dabei wird vereinfachend unterstellt, dass die Pipeline ganzjährige Verfügbarkeit bei voller Auslastung gewährt. Eine realistische Dimensionierung wäre also entsprechend größer, damit technologietypische Betriebszeiten und Auslastungen erreicht werden.

In Deutschland stehen durch den direkten Wasserstofftransport nach Rückverstromung (Wirkungsgrad nach [Wienholt and Kleinhans, 2015] bei $\eta_{el} = 0,63$) weitere 32 TWh_{el} für die Lastdeckung zur Verfügung. Diese Energiemenge reicht nicht aus, um die regionale Energienachfrage von 93,4 TWh (nach Einsatz der regionalen H₂-Speicher) zu decken. Dadurch dass die zusätzlich verfügbare Energie zeitnah zur Lastdeckung eingesetzt wird, wird auch die Auslastung der Speichereinheiten nicht signifikant erhöht. Die ausgespeicherte elektrische Energie erhöht sich

¹Im Vergleich: Die mittlere Übertragungsleistung der Nord Stream Erdgaspipeline beträgt bei voller Auslastung rund 61 GW_{th}. (bei Brennwert von 10,3 kWh/m³ und 55 Mrd. m³/a) Quelle: www.nord-stream.com (Abruf: 22.09.2016)

entsprechend dem zusätzlichen Zufluss, jedoch werden die Speicherkapazitäten weiterhin nur geringfügig ausgenutzt. Die vorangegangenen ex-post Analyse ohne Wasserstoffpipeline hatte eine Ausnutzung der Speicherkapazitäten von etwa 5% des technischen Potenzials zur Folge. Durch den zusätzlich verfügbaren Wasserstoff aus Skandinavien wird die Ausnutzung auf etwa 15% erhöht.

Die Verluste, welche sich aus der Nutzbarmachung der Überschüsse aus Skandinavien ergeben betragen gemäß der unterstellten Wirkungsgrade (für H₂-Erzeugung und Rückverstromung jeweils $\eta = 0,63$ [Wienholt and Kleinhans, 2015]) etwa 50 TWh.

Der übertragene Wasserstoff muss jedoch nicht zwangsläufig der Rückverstromung zugeführt werden. Im Rahmen einer vollständigen Energiewende gibt es zahlreiche Verbrauchssektoren, deren Dekarbonisierung schwieriger ist als die des Stromsektors. Hier kann der übertragene Wasserstoff alternativ als wichtiger Treibstoff (z.B: im Sektor Mobilität) oder als Energieträger im Bereich chemischer Prozesse verwendet werden. Im Falle einer sektorenübergreifenden Nutzung stünden weiterhin die 52 TWh_{th} zur Verfügung. Einen Überblick über mögliche Einsatzfelder und die perspektivische Entwicklung der Nachfrage ist [Vogt et al., 2016a] zu entnehmen. Für die alternative Verwendung von Wasserstoff zur Sektorkopplung ist die bestehende Infrastruktur insb. in Deutschland bereits gut strukturiert, da sich sehr leistungsstarke Zugänge zur Gas-Infrastruktur im Norden des Landes befinden.

3.3 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die regionale Wasserstofferzeugung in den Überschussregionen und der anschließende Wasserstofftransport eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der EE-Deckungsraten in Europa darstellt. Allerdings wird deutlich, dass hierfür aufgrund der Leistungscharakteristik der entstehenden Überschüsse erhebliche H₂-Erzeugungskapazitäten notwendig sind.

Selbst bei vollständiger Nutzung der Überschüsse aus der Beispielregion Skandinavien bleiben die resultierenden H₂-Transportkapazitäten im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten, sowohl mit als auch ohne unterstellte Pufferspeicherkapazitäten in Skandinavien. Eine ökonomisch sinnvolle Auslastung der Pipeline kann vermutlich jedoch nur gewährleistet werden, wenn ein Pufferspeicher zur Aufnahme von Erzeugungsspitzen berücksichtigt wird.

Selbst durch eine vollständige Aufnahme der Energieüberschüsse aus Skandinavien in Form von Wasserstoff, werden die innerdeutschen Speicherpotenziale nur geringfügig stärker ausgelastet. Die hier durchgeführte Untersuchung hat einen eher beispielhaften Charakter, um die Größenordnung der nötigen Infrastruktur grob abzuschätzen. Die Kopplung anderer Überschuss- und Nachfrageregionen kann sich als zielführender herausstellen. Der überregionale Wasserstofftransport, welcher stark verlustbehaftet ist, ist zudem grundsätzlich gegenüber zusätzlichem Stromnetzausbau abzuwägen.

Der Energieaustausch auf Basis von Wasserstoff ermöglicht neben der Rückverstromung auch die sektorübergreifende Nutzung der Stromüberschüsse. Dies führt einerseits zu geringeren Wandlungsverlusten und erhöht andererseits die EE-Anteile in Verbrauchssektoren, deren Dekarbonisierung aufwändig ist.

4 Überregionaler Einsatz der H₂-Speicher

In diesem Kapitel wird erläutert, wie sich der Einsatz von Wasserstoffspeichern auf das europäische Stromsystem auswirkt. Dabei werden Wasserstoffspeicher so eingesetzt, dass sie ausschließlich überschüssige EE-Strommengen einspeichern und zu Zeiten positiver Residuallast verfügbar machen. In den vorangegangenen Arbeiten des RESTORE2050 Projektes können diese Analysen nicht durchgeführt werden, da für die Betrachtung eine Weiterentwicklung des Optimierungsmodells notwendig ist, die im Rahmen von RESTORE2050_plus durchgeführt wird. Im Folgenden wird zunächst auf die Weiterentwicklung selbst eingegangen, dann werden die neuen Simulationsergebnisse vorgestellt und mit bereits bestehenden Ergebnissen verglichen. Dabei geht es zunächst um den Zusatznutzen durch die Implementierung der Wasserstofftechnologien. Darüber hinaus wird untersucht, wie sich die Einbindung und Relevanz der Wasserstoffspeicher verändert, wenn das abgebildete Stromsystem nicht, wie bisher, nur zu weiten und fixierten Anteilen (etwa 90%) mit Erneuerbaren Energien versorgt wird, sondern eine vollständige EE-Deckung angestrebt wird. Zu diesem Zweck werden weitere Simulationen durchgeführt, in der die installierten EE-Kapazitäten systematisch erhöht und die Auswirkungen auf das Stromsystem analysiert werden.

4.1 Methodik: Nutzbarmachung von EE-Überschüssen durch H₂-Speicher im europäischen Stromsystem mit überregionalem Energieaustausch - Weiterentwicklung des RESTORE2050 Optimierungsmodells

Für die eingangs sowie oben genannten Fragestellungen wird das RESTORE2050 Optimierungsmodell im Hinblick auf den Einsatz von Wasserstoffspeichern weiterentwickelt. Die Notwendigkeit wird bei der Auswertung der Ergebnisse im Vorhaben RESTORE2050 identifiziert, da sich zeigt, dass durch den systemdienlichen Einsatz von H₂-Speichern zur Residuallastglättung die EE-Deckungsrate im europäischen Stromsystem deutlich abgesenkt wird. Dieser Effekt ist auf den dort untersuchten systemdienlichen Einsatz (Senkung von positiven Residuallastspitzen u.a. durch Anheben geringer Residuallasten) zurückzuführen, der bei Verwendung der Wasserstoffspeicher stark verlustbehaftet ist. Dadurch geht zusätzlich EE-Strom "verloren", so dass der EE-Deckungsgrad sogar sinkt anstatt zu steigen. Folglich werden die H₂-Speicher hier nur noch so eingesetzt, dass sie Energie lediglich in Zeiten von EE-Überschüssen aufnehmen, diese jedoch weiterhin möglichst systemdienlich in Zeiten maximaler Residuallast ausspeichern.

Um das Speicherverhalten zu beeinflussen, wird die bestehende Zielfunktion um einen Term ergänzt, der zu einem Aufschlag (Malus) auf den Funktionswert führt, wenn die positive Residuallast im Gesamtsystem durch den H₂-Speichereinsatz erhöht wird. Für die detaillierte Dokumentation der Zielfunktion sei auf den Bericht D7 „Modellbeschreibung: Einsatzmodell für Flexibilitätsoptionen im europäischen Stromsystem“ [Buddeke et al., 2016] verwiesen.

Zur Bestimmung des neuen Optimums wird vom verwendeten Solver eine Iteration durchgeführt, bei der die verfügbaren Variablenwerte systematisch so verändert werden, dass dies zu einem Minimum des Funktionswertes (Summe der positiven Residuallast) führt. Die Speicherleistungen (P_{H_2}) der H₂-Speicher sind dafür ebenfalls als Variable implementiert. Da sich die H₂-Speicherleistung sowohl steigernd als auch senkend auf den Funktionswert auswirken kann, wird in jedem Iterationsschritt der Optimierung zusätzlich berechnet, welchen Wert die Summe der positiven Residuallast (Funktionswert) im Gesamtsystem aufweist, wenn die H₂-Speicher in diesem Schritt ungenutzt blieben ($P_{H_2} = 0$). Aus dem Vergleich dieser parallelen Berechnung lässt sich schließen, ob die H₂-Speicher systemdienlich arbeiten (verlustbehaftete Lastglättung)

oder ob sie lediglich Überschüsse aufnehmen. Da dabei lediglich positive Residuallasten berücksichtigt werden, wirkt sich der Speichereinsatz in Zeiten negativer Residuallast (Aufnahme von überschüssigem Strom) nicht auf das Ergebnis aus. Die ermittelte Differenz ΔRL zwischen dem Funktionswert mit aktueller Variablenkonfiguration (gemäß Iterationsschritt) und dem mit angepasstem H₂-Speichereinsatz ($P_{H_2} = 0$) kann zum Unterbinden des unerwünschten Einsatzverhaltens genutzt werden. Im Falle einer Erhöhung der Residuallast durch die H₂-Speicher wird die Differenz zunächst exponenziert, um dem Malus eine starke Wirkung zu verleihen. (Der Exponent 4 hat in den Untersuchungen zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt). Um bei Differenzen <1 keine Herabsetzung des Malus durch die Exponenzierung zu erreichen, beträgt der Malus grundsätzlich $(1 + \Delta RL)^4$. Anschließend wird der Malus zum Funktionswert des aktuellen Iterationsschrittes addiert. So kann effektiv erreicht werden, dass eine Erhöhung der Residuallast durch die H₂-Speicher nicht als optimales Ergebnis identifiziert wird.

In den vorangegangenen Berechnungen des RESTORE2050 Vorhabens wird bei allen Speichern ein initialer Füllstand von 50% berücksichtigt. Dies umfasst jedoch mehrheitlich kleine Tagesspeicher, sowie Saisonalspeicher, deren jährlicher Einsatz zunächst in groben Zeitschritten (73 h) geplant wird. Hier ist es sinnvoll mit einem wenigstens teilweise gefüllten Speicher zu beginnen, um gleich zu Jahresbeginn das saisonale Verhalten flexibel planen zu können. Die H₂-Speicher werden in der neuen Einsatzstrategie nicht saisonal, sondern lediglich mit der beschränkten Vorausschau von 24 h geplant. Aus diesem Grund und aufgrund der verhältnismäßig großen Speicherkapazitäten erscheint es nicht sinnvoll, auch für die H₂-Speicher einen initialen Füllstand $>0\%$ zu implementieren. Zudem zeigen die vorangegangenen ex-post Berechnungen, dass die H₂-Speicherkapazitäten regional z.T. nur geringfügig ausgenutzt werden. Folglich werden die H₂-Speicher in den aktuellen Berechnungen mit einem Startfüllstand von 0% implementiert. Alle übrigen Speichertypen, für die auch wie zuvor die systemdienliche Einsatzstrategie gilt, starten mit 50% Füllstand um die Vergleichbarkeit zu den bisherigen Berechnungen aufrechtzuerhalten.

4.2 Auswirkungen des zusätzlichen Ausbaus von Wasserstoffspeichern auf das Gesamtsystem

Im RESTORE2050 Vorhaben werden bereits Berechnungen mit maximalem Speicher- und Netzausbau durchgeführt (Simulationsbezeichnung „S“). In diesen werden das technische Potenzial von Wasserstoffspeichern für den systemdienlichen Einsatz aufgrund der dargestellten negativen Wirkung auf die EE-Deckungsrate nicht weiter berücksichtigt. Nach der Erweiterung der Zielfunktion können nun weitere Simulationsrechnungen durchgeführt werden, welche zusätzlich die H₂-Speicher abbilden. Da sich bereits aus den RESTORE2050 Ergebnissen sowie aus den ex-post Analysen in Kapitel 2 zeigt, dass der Ausbau des Übertragungsnetzes für die Verteilung der EE-Strommengen besonders wichtig ist, werden die weiteren Analysen grundsätzlich unter Annahme des maximalen Übertragungsnetzes durchgeführt. Dies gewährleistet, dass die europaweit verteilten H₂-Speicherkapazitäten bestmöglich eingesetzt werden können.

In diesem Kapitel wird insbesondere auf die neue Berechnung mit der Bezeichnung „Q“ eingegangen. Diese gleicht in Annahmen weitgehend der Berechnung S (ISI-Szenario, Wetterjahr 2004, Max-Netz, Max-Speicher), allerdings werden hier zusätzlich die H₂-Speicherkapazitäten berücksichtigt, wie in der Potenzialanalyse [Wienholt and Kleinhans, 2015] identifiziert. Die verwendeten H₂-Speicher sind ebenfalls in Tabelle 1 (Seite 6) dargestellt.

4.2.1 Auswirkungen auf die Deckungsrate und Backup-Kapazitäten

Die bilanzielle EE-Deckungsrate von 102,2% unterscheidet sich in den beiden Simulationen aufgrund der identischen Szenariogrundlage nicht. Allerdings zeigt sich der Zusatznutzen der H₂-

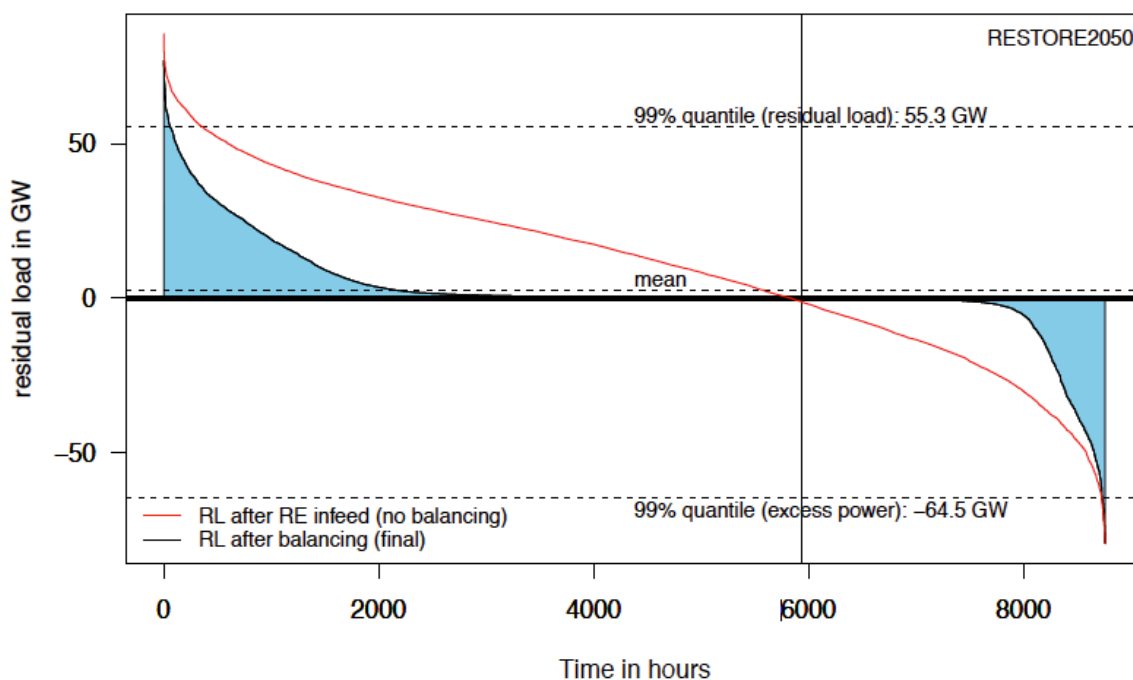


Abbildung 10: Jahresdauerlinie der Residuallast in Deutschland in Simulation S ohne H2-Speicher.
Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

Speicher in der finalen **dynamischen EE-Deckungsrate**. Während in Simulation S unter Verwendung der maximalen Speicherpotenziale ohne H2-Speicher etwa 93,7% der Stromnachfrage durch Erneuerbare Energien gedeckt werden können, führen die zusätzlichen Kapazitäten in Q zu 96,1% (+2,4%) EE-Deckung. Zum Ende des simulierten Wetterjahres 2004 entstehen meteorologisch bedingt starke Erzeugungsüberschüsse. Diese führen dazu, dass die H2-Speicher zum Jahresende einen höheren Speicherfüllstand aufweisen als zu Jahresbeginn. Unter der Annahme, dass diese Überschüsse im Laufe des nächsten Jahres problemlos vor Ort nutzbar gemacht werden können, werden diese Energiemengen in der o.a. dynamischen Deckungsrate mitberücksichtigt. Dies dient auch der Erreichung einer ausgeglichenen Energiebilanz über das Betrachtungsjahr. Dabei wird der Ausspeicherwirkungsgrad der H2-Speicher ($\eta_{\text{H2,discharge}} = 0,63$) als Faktor für die tatsächlich verfügbare Energie angesetzt. Zusammen mit den entstehenden Speicherverlusten in den H2-Speichern sowie der zum Ende des Simulationszeitraums in den Speichern befindliche Energiemenge von 23,13 TWh wird in Simulation Q europaweit eine zusätzliche Aufnahme von 198 TWh an EE-Erzeugung erreicht.

Deutlicher werden die Auswirkungen der zusätzlichen Speicherkapazitäten bei der Betrachtung der nötigen **Backup-Kapazität**. In der Simulation S werden europaweit etwa 264 GW (99% Quantil bei 203 GW) an Backup Kapazitäten benötigt. Diese vorgehaltene Kapazität wird mit insgesamt 837 Volllaststunden ausgenutzt. Bei Berücksichtigung der H2-Speicher in Simulation Q kann die maximale Residuallast im Gesamtsystem auf 247 GW (99% Quantil bei 177 GW) abgesenkt werden. Dadurch entsteht eine Auslastung des nötigen Kraftwerksparks von lediglich 670 Volllaststunden in dem simulierten Jahr. Die Anlagen zur Rückverstromung des erzeugten Wasserstoffs gleichen technisch weitgehend den Backup-Kapazitäten (Gaskraftwerke).

Eine Untersuchung der Auslastung der Rückverstromungskapazitäten während des Auftretens der maximalen Residuallast ergibt, dass lediglich 6,6 GW von insg. 221 GW der H2- Ausspeicherleistung genutzt werden. Folglich stehen weite Teile der Kraftwerkskapazitäten sowohl für die Residuallastdeckung als auch zur Nutzung als Rückverstromungseinheit zur Verfügung. Nach dieser stark vereinfachten Rechnung müssten lediglich 32 GW an zusätzlicher installierter Kraftwerksleistung für die Backup Versorgung vorgehalten werden.

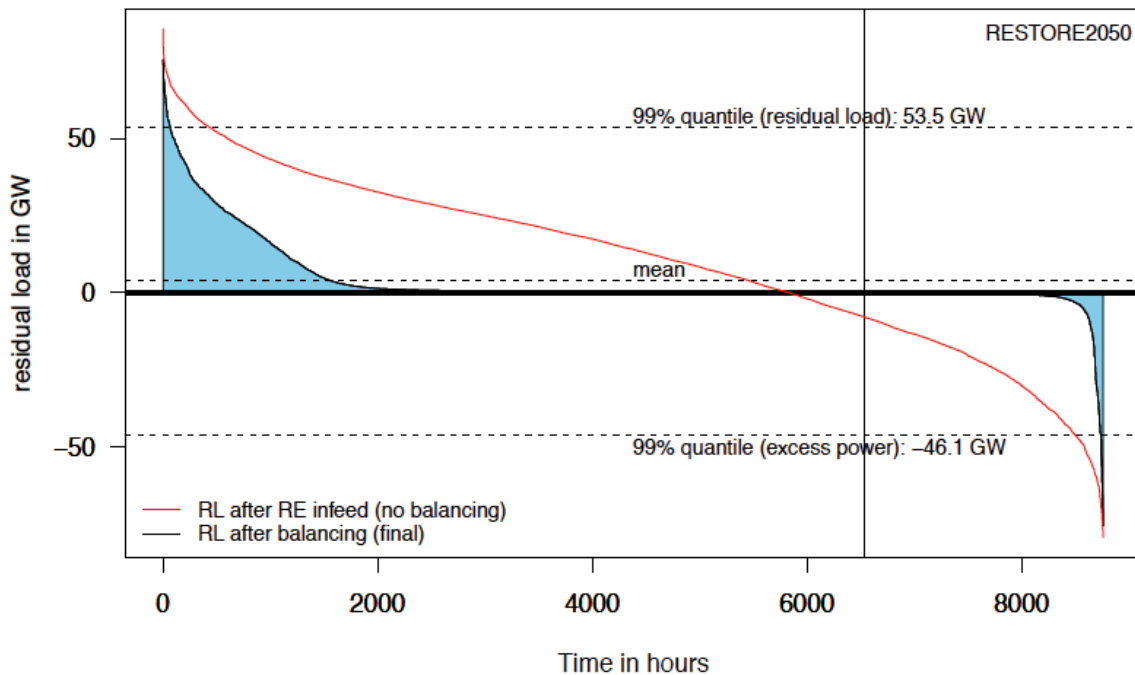


Abbildung 11: Jahresdauerlinie der Residuallast in Deutschland in Simulation Q mit H2-Speichern.
 Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

Durch die Verwendung der H2-Speicher erhöhen sich die regionalen EE-Deckungsraten in allen Einzelregionen. Dabei ist festzustellen, dass die Erhöhung in den Ländern mit technischem H2-Potenzial nicht signifikant stärker ansteigt, als in den übrigen Regionen. Der Grund dafür ist das in den Simulationen unterstellte stark ausgebaute Übertragungsnetz, welches zwar den Abtransport der zuvor gespeicherten Energie in die Nachfragezentren ermöglicht, jedoch beim Export aus den Überschussregionen noch immer an seine Grenzen stößt. So kommt es z.B. in Skandinavien häufig zu großen Überschussleistungen, die die Summe aus regionalen Beladeleistungen und den Exportkapazitäten übersteigt, so dass Leistung abgeregelt werden muss, obwohl andernorts Ladekapazitäten nicht vollständig ausgelastet werden.

In Deutschland führt der Einsatz der H2-Speicher zu einer regionalen Steigerung der EE-Deckungsrate um etwa 1% auf ca. 93%. Durch die vergleichenden Darstellungen in den Abbildungen 10 und 11 ist zu erkennen, dass durch den Einsatz der H2-Speicher die negativen Residuallasten (Überschussleistungen) stark abgebaut werden können (24,33 TWh in S und 5,48 TWh (-77%) in Q). Zu einer signifikanten Reduktion der z.T. hohen Nachfragespitzen führen die Speicher unter Verwendung der aktuellen Zielfunktion jedoch nicht. In Summe wird die Residuallast von 46,5 TWh (S) im 23% auf 35,4 TWh (Q) reduziert. Dadurch, dass die Verteilung verfügbarer Energie auf Lastspitzen stets nur innerhalb des Optimierungshorizontes von 24 Stunden vorgenommen wird, halten die Speicher in den Zeiten großer Residuallasten oft keine Energie mehr vor. Auffällig ist jedoch der stark angestiegene Zeitraum, in dem die Residuallast nahezu bei 0 liegt. Durch den Einsatz der H2-Speicher steigt dieser Zeitraum um etwa ein Viertel auf 5500 h an.

4.2.2 Auswirkungen auf Speicherkapazitäten.

Der Einsatz der H2-Speicher als zusätzliche Speicherkapazitäten in Simulation Q wirkt sich auf die Einsatzplanung der übrigen Speicher im System aus. Welche Speicher neben den H2-Speicherkapazitäten in den Modellrechnungen berücksichtigt wurden, ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Technologien, welche im Rahmen der saisonalen Einsatzplanung berücksichtigt werden, tragen ein „seasonal“ in der Typenbezeichnung. Mit „Merged storage“ sind verschiedene Speichereinheiten bezeichnet, die im Rahmen der regionalen Aggregation zusammengefasst sind. Dies

sind in der Regel mehrere Pumpspeicherwerke (PHS), die in der gleichen Region liegen und ein ähnliches Verhältnis von Ein- bzw. Ausspeicherleistung zur Speicherkapazität aufweisen. Wie dies im Einzelnen vorgenommen wird, ist der Modellbeschreibung [Buddeke et al., 2016] zu entnehmen. Für eine Auflistung der berücksichtigten H2-Speicher siehe Tabelle 1 auf Seite 6.

Insgesamt sind die Änderungen des Einsatzverhaltens der bestehenden Speichereinheiten eher geringfügig im Hinblick auf die ausgespeicherte Energiemengen und die daraus resultierenden äquivalenten Vollladezyklen. Durch den H2-Speichereinsatz kommt es bei vielen Speichern zu einer leichten Steigerung im einstelligen Prozentbereich. Regional bedingt kann der Speichereinsatz jedoch auch leicht abnehmen (z.B. in Skandinavien). Auffällig ist jedoch, dass nahezu alle Speicher eine geringere Anzahl an Lastwechseln aufweisen. Bei den Kurzzeit- und Tagesspeichern beträgt diese Reduktion zwischen 6% und 19%.

Durch die verhältnismäßig großen H2-Speicher in den Überschussregionen wird eine Verstärkung der Energieübertragung zwischen den Regionen erreicht. Im Falle von Erzeugungsüberschüssen kann die Energie in die großen H2-Speicher aufgenommen werden. Zeitgleich sind die Exportkapazitäten oft ausgelastet, so dass die H2-Speicher die Energie zeitlich flexibilisieren und über ausgedehnte Zeiträume in die Nachfrageregionen abführen können. Dies führt dort dann zu einem geringeren Bedarf an kurzzeitiger Flexibilisierung und einer Abnahme der Lastwechsel. Im Falle eines überregionalen Überschusses wird die Energie effizienzbedingt zunächst in die Kurzzeitspeicher der anderen Regionen aufgenommen, wodurch sich deren verstärkter Einsatz erklären lässt. Gleichzeitig verringern sich die Fluktuationen in der Energieübertragung und Nachfragedeckung durch die flexiblen Ausspeichervorgänge der H2-Speicher. Dies kann zu der Minderung der Lastwechsel in den Speichern führen. Bestätigt wird dies dadurch, dass sich die Verweilzeit²

²Für alle Zeitpunkte, in denen Entladung stattfindet, gibt die Verweilzeit an, wie lange die Energiemenge bereits eingespeichert war. Dafür wird für jeden Zeitschritt (bei Entladung) so lange die Summe über unmittelbar zurückliegende

Region	ID	P _{ch} [GW]	P _{dis} [GW]	C[GWh]	Typ
1 Ib. Halbinsel	19	21,4	21,4	311,1	Merged Storage
	17	11	11	1612	PHS
	18	0	9,2	17840	PHS-seasonal
2 Westeuropa	4	19,8	20,1	296	Merged Storage
	22	0	6,3	10419	PHS-seasonal
	30	0	5	8531	PHS-seasonal
3 GB	26	80,3	80,3	808	Merged Storage
4 DE	11	49,1	49,1	462	Merged Storage
5 Skandinavien	14	3,4	3,4	31	Merged Storage
	38	0	25,8	86656	PHS-seasonal
	48	0	11,1	34041	PHS-seasonal
6 Osteuropa	3	80,4	80,4	800	Merged Storage
	32	0,8	0,8	49	PHS
7 Alpenraum	1	5,5	7,1	507	Merged Storage
	2	0	3,8	3316	PHS-seasonal
	9	0	8,3	8989	PHS-seasonal

Tabelle 4: Berücksichtigte Speicher in der Simulation S ohne H2-Speicher

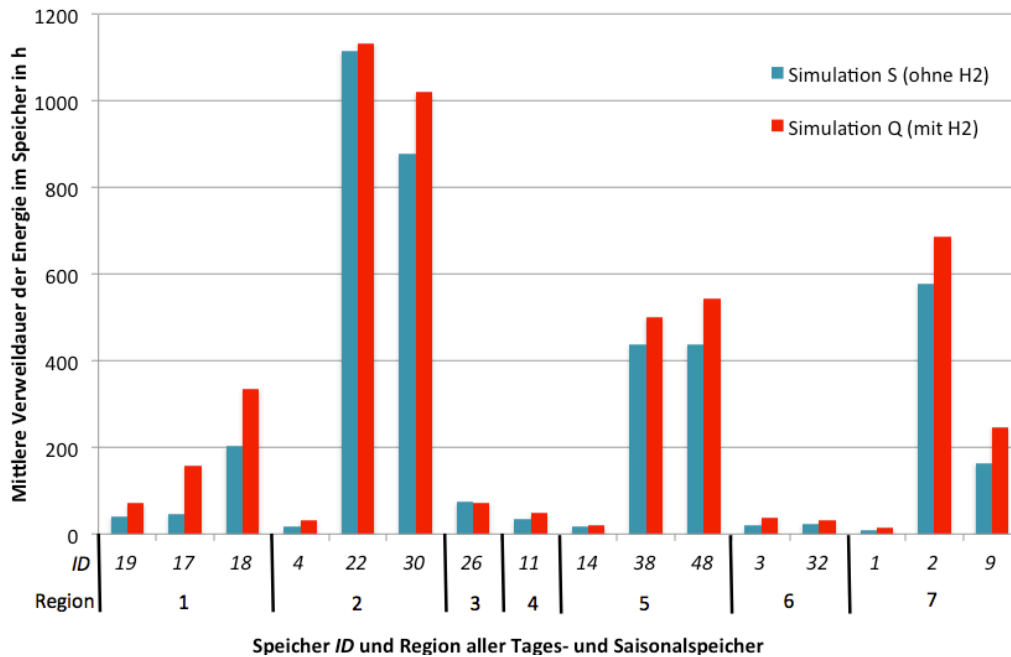


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Verweildauer von eingespeicherter Energie aller Speicher aus Simulation S mit den Ergebnissen aus Simulation Q.
 Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

der Energie in den Speichern in Simulation Q in den meisten Speichern deutlich erhöht. Abbildung 12 stellt diesen Sachverhalt dar. Ein Anstieg der Verweildauer ist ein Indiz dafür, dass die Versorgungssicherheit in einer Region steigt, da die Energie im Mittel länger vorgehalten werden kann. Bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen weist ein Anstieg auch auf geringeren Flexibilitätsbedarf in der Region hin. Daraus folgt, dass konventionelle Kurzzeit- und Tagesspeicher zwar im Mittel etwas höhere Auslastungen (äq. Vollladezyklen) aufweisen, die Beanspruchung der Technologien durch die geringere Anzahl an Wechsels im Betriebsmodus jedoch sinkt. Der Einsatz der Saisonspeicher zeigt nur sehr geringe Änderungen durch den Einsatz der H2-Speicher. Grundsätzlich stehen die meisten Saisonspeicher, welche als Speicherwasserkraftwerke über keine Beladefunktion verfügen, sondern über einen fluktuierenden natürlichen Zufluss befüllt werden, nicht in direkter Konkurrenz zu den H2-Speichern. Bei einigen Saisonspeichern wird während des Jahres der maximale Füllstand erreicht, so dass trotz voller Nutzung der Ausspeicherleistung ein Teil des natürlichen Zuflusses abgeregelt werden muss. Da der Engpass jedoch in der geringen Turbinenleistung der jeweiligen Speicher begründet ist, können auch die großen H2-Speicherleistungen nicht zur Vermeidung dieses Effektes beitragen. Folglich ist neben dem Speicherausbau von H2-Speichern zunächst darauf zu achten, dass vorhandene Speicherkapazitäten effizient ausgenutzt werden. Hier könnte z.B. zunächst geprüft werden, ob Turbinenleistung und Speicherkapazitäten der Saisonspeicher sinnvoll dimensioniert sind. Im Falle zu kleiner Energiewandler, bezogen auf die Speicherkapazitäten, kann hier zunächst relativ einfach eine Erhöhung der EE-Deckungsrate ermöglicht werden. Wie bereits in den ex-post Analysen in Kapitel 2 festgestellt, stehen im Verhältnis zu den auftretenden EE-Erzeugungsüberschüssen sehr große Speicherpotenziale für H2-Speicher zur Verfügung. Auch aus der hier vorgenommenen Modellrechnung „Q“ geht hervor, dass die Potenziale bei voller Erschließung nur sehr geringfügig ausgelastet werden. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über zentrale Ergebnisparameter der H2-Speicher aus der Simulation. Es fällt auf, dass lediglich die Einheiten in den starken Überschussregionen (3-Großbritannien und 5-Skandinavien) mehr als 10% der verfügbaren Speicherkapazität ausnut-

Ein- und Ausspeichervorgänge gebildet, bis die Bilanz ausgeglichen (= 0) ist. So kann die maximale Verweilzeit eines Anteils der ausgespeicherten Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmt werden. Natürliche Zuflüsse werden mit berücksichtigt. Die mittlere Verweilzeit stellt den mit den Energiemengen gewichteten Mittelwert aller Verweilzeiten dar.

zen. Die maximale Nutzung fällt dabei auf die H₂-Speicher in Großbritannien mit 20% bzw. 23%. In den übrigen Regionen werden lediglich 5-10% ausgenutzt.

Ein ähnliches Bild zeichnet sich in Bezug auf die Auslastung der Elektrolyseure und Rückverstromungsanlagen ab. Keine der abgebildeten Speichereinheiten erreicht eine Auslastung von 1000 Volllaststunden für Be- und Entladung.

Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass die H₂-Speicher im Hinblick auf die Verweildauer der Energie in den Speichern in einem sehr begrenzten Zeitfenster arbeiten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Speicher grundsätzlich nur zur Aufnahme von Erzeugungsüberschüssen eingesetzt werden und die aufgenommene Energie unmittelbar abgeben, wenn die Überschusszeiten enden. Daher beträgt die mittlere Verweildauer der Energie in den Speichern zwischen wenigen Tagen und etwa einer Woche in den Nachfrageregionen. Durch die lange andauernden EE-Überschüsse in den Regionen 3 (Großbritannien) und 5 (Skandinavien) ergeben sich für die dort angesiedelten Speicherkapazitäten längere mittlere Verweildauern. Hier spielt jedoch das „Engpassmanagement“ der Kuppelstellen zu den angrenzenden Nachfrageregionen eine Rolle. Dadurch, dass die Energie in den H₂-Speichern (vor dem Export) zwischengespeichert wird, vergrößert sich die Verweildauer der Energie im Speicher gegenüber einer direkten Nutzung in den Fällen, in denen die Exportkapazität voll ausgelastet ist.

4.2.3 Auswirkungen auf das Übertragungsnetz.

In der Simulation „Q“ wird ausschließlich das im RESTORE2050 Projekt ermittelte maximale Übertragungsnetz berücksichtigt. Dieses ist so dimensioniert, dass 90% der Energie, welche im Falle einer unterstellten Kupferplatte übertragen wird, ausgetauscht werden kann. Dies führt zu Leitungskapazitäten, die die aktuellen Ausbauplanungen weit überschreiten. Für die hier durchgeführte regionale Aggregation sind die Übertragungsleitungen zwischen den Ländern in der jeweiligen Region zu den Ländern in den anderen Regionen zusammengefasst und die Kuppelleitungen zwischen den Ländern innerhalb der Regionen nicht weiter berücksichtigt. In den Abbildungen 13 und 14 sind die resultierenden Kuppelleistungen zwischen den Regionen dargestellt. Zusätzlich kann den Abbildungen die Auslastung der Kuppelleitungen in der jeweiligen Simulation

Region	ID	P _{ch,dis} [GW]	C[GWh]	Ausnutzung der Kapazität [%]	Äq. Vollladezyklen	Mittl. Verweildauer [h]
1 Ib. Halbinsel	200	29,8	29804	10	0,2	162
	440	6	6019	8	0,4	61
2 Westeuropa	230	50,8	50753	7	0,2	166
	360	12,7	12704	6	0,3	80
3 GB	280	2,8	2781	20	0,9	100
	52	38,8	38750	23	0,6	287
4 DE	130	56,8	56787	6	0,2	155
5 Skandinavien	150	3,9	3947	15	0,8	100
6 Osteuropa	70	3,5	3543	5	0,3	31
	41	16,7	16664	5	0,2	67

Tabelle 5: Nutzungsparameter der H₂-Speicher in Simulation Q *Datenbasis:* Modellberechnungen RESTORE2050_plus

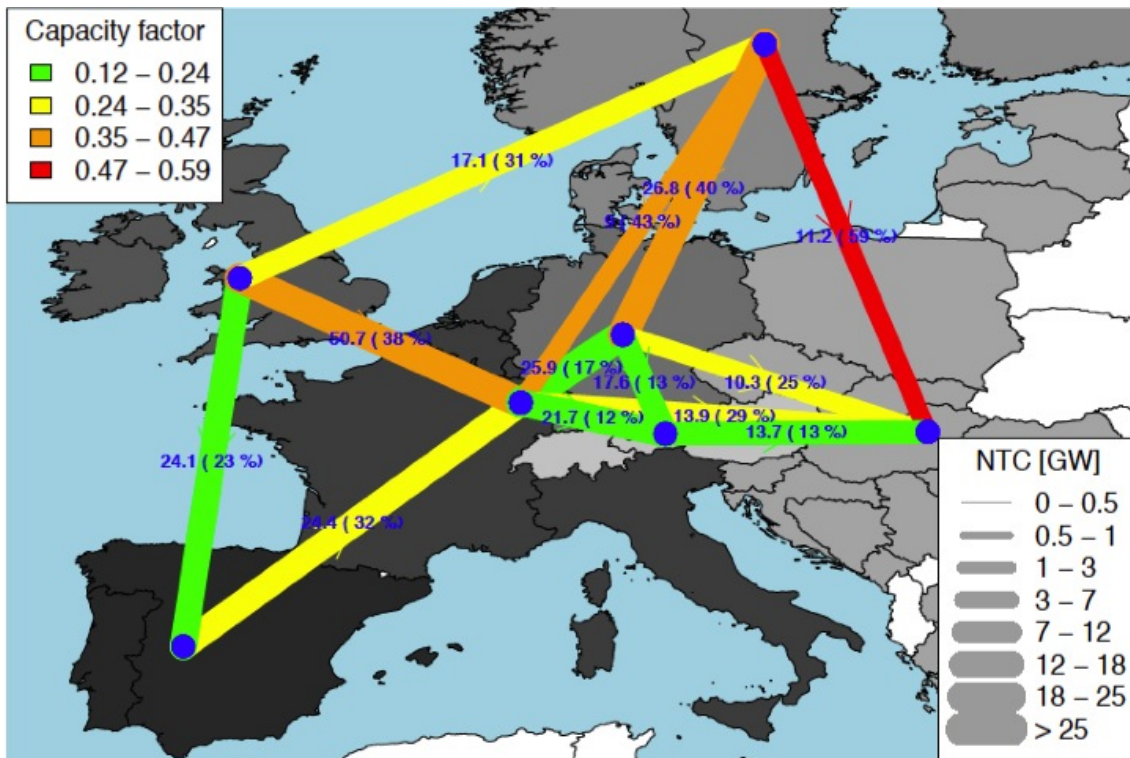


Abbildung 13: Auslastung des Übertragungsnetzes in Simulation S (ohne H2-Speicher). Angaben auf den Leitungen: Kapazität [GW] (Gesamtauslastung [%]) Speicher.
Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

entnommen werden.

Durch die Verwendung der H2-Speicher in Europa in Simulation Q stellt sich flächendeckend eine höhere Auslastung des Übertragungsnetzes ein. Während der Energietransfer in Mitteleuropa (zwischen den Regionen 2, 4, 6 und 7) nur geringfügig ansteigt (zwischen Region 4 (DE) und 6 (Osteuropa) ist sogar eine geringe Reduktion der übertragenen Energie zu beobachten), steigen vor allem die Exportmengen aus den Überschussregionen an. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erläutert, tragen die Wasserstoffspeicher zu einer zeitlichen Flexibilisierung des Energieexports bei. Am Beispiel von Großbritannien zeigt sich, dass die Auslastung der Kuppelleitung nach Westeuropa um ca. 10% ansteigt. Dies entspricht einer zusätzlich exportierten Energiemenge von ca. 43 TWh. Durch die H2-Speicher ergibt sich folglich eine stärkere Auslastung des Übertragungsnetzes. Dieses ist jedoch andererseits Grundlage für die erfolgreiche Implementierung der Speicher und die Nutzbarmachung regionaler Energieüberschüsse.

4.3 Fazit

Der Einsatz der Wasserstoffspeicher zur Aufnahme von EE-Erzeugungsüberschüssen zeigt positive Auswirkungen auf die Deckungsrate im europäischen Stromsystem. Dabei können jedoch die vorhandenen technischen Potenziale der Technologie insbesondere im Hinblick auf die Speicherkapazität nicht ausgelastet werden.

Auf alternative Speichertechnologien hat die Einbindung der H2-Speicher geringe Auswirkungen. Insgesamt ist eine Abnahme der Lastwechsel bei den anderen Speichertechnologien bei leichtem Anstieg der Auslastung zu beobachten.

Auf die Arbeitsweise der Speicherwasserkraftwerke hat die Nutzung der H2-Speicher keinen erkennbaren Einfluss. Auch werden die vorhandenen Engpässe bei der Ausspeicherleistung dieser Kraftwerke nicht durch die zusätzlichen Flexibilitäten reduziert. Zudem werden die großen Saisonalspeicherkapazitäten (wie im Fall ohne H2-Speicher auch) nicht ganzjährig ausgenutzt,

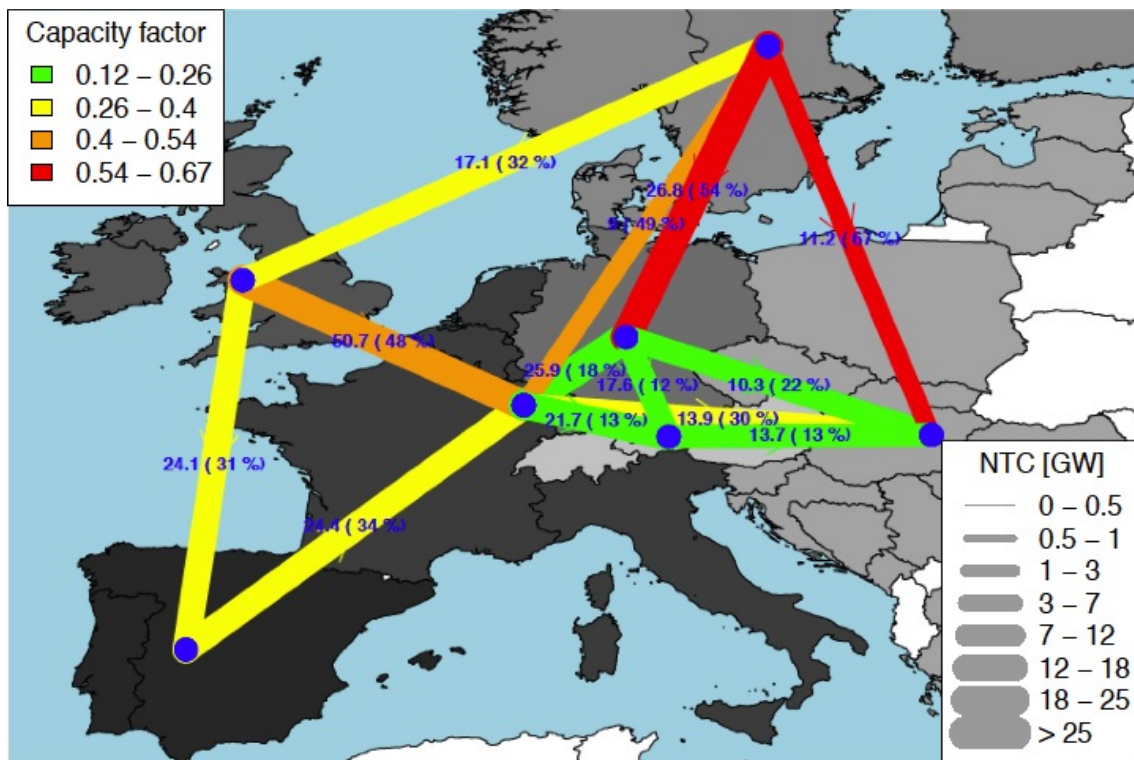


Abbildung 14: Auslastung des Übertragungsnetzes in Simulation Q (mit H₂-Speichern). Angaben auf den Leitungen: Kapazität [GW] (Gesamtauslastung [%])
Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

da sie über keine Beladepkapazitäten verfügen. Die Schaffung oder Vergrößerung der Be- und Entladekapazitäten der Saisonspeicher stellt daher zunächst eine bevorzugte Lösung zur Steigerung der Systemflexibilität gegenüber dem H₂-Speicherausbau dar. Zum einen, weil Technologiestandorte und Speicherreservoirare bereits erschlossen sind, zum anderen weil die Technologien (insb. Pumpspeicherwerke (PSW)) einen wesentlich höheren Wirkungsgrad aufweisen.

Der Übertragungsnetzausbau stellt die Grundlage für eine erfolgreiche Implementierung der H₂-Speichertechnologien dar, da die größten Speicherpotenziale in Nachfragerregionen konzentriert sind. Es zeigt sich jedoch auch, dass die vorhandenen Übertragungsleitungen durch den Einsatz der H₂-Speicher stärker ausgelastet werden können und dadurch die Abregelung in Überschussregionen gemindert wird. Dieser Einsatzzweck muss jedoch gegenüber einer weiteren Vergrößerung der Netzkapazitäten abgewogen werden. Obwohl eine Untersuchung der weiterführenden Erhöhung der Kuppelkapazitäten im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt wurde, ist zu vermuten, dass diese einen größeren Einfluss auf die Deckungsrate hat als der Effekt, der durch die H₂-Speicher auf die übertragene Energiemenge zwischen den Regionen erzielt wird.

5 Exkurs: Veränderung des Wasserstoff-Speichereinsatzes bei Erhöhung des EE-Angebots

Die Deckungsrate ist durch die zuvor dargestellte Anwendung der H₂-Speicher gegenüber der Simulation S (ohne H₂-Speicher) lediglich um 2,4% gestiegen, wobei die Speicher je nach Region zum Teil noch relativ wenig ausgelastet sind. Andere Studien verweisen darauf, dass der Einsatz von H₂-Speichern erst signifikant ansteigt, wenn sehr hohe EE-Deckungsraten von nahezu 100% erreicht werden sollen (vgl. z.B. [Nolden et al., 2016]). Bei diesen sehr hohen Deckungsraten steigen auf der einen Seite die Erzeugungsüberschüsse überproportional an. Durch den Einsatz der H₂-Speicher entstehen auf der anderen Seite jedoch auch große Verluste, die kompensiert werden müssen. Die Speicher stellen im Hinblick auf ihre Speicherkapazität und Leistung sehr große Flexibilitätsreserven dar, die für eine vollständige EE-Stromversorgung notwendig sind. Daher wird hier gesondert untersucht,

- welcher zusätzliche EE-Zubau notwendig ist, um 100% erneuerbare Stromerzeugung zu erreichen
- wie sich das Einsatzverhalten der H₂-Speicher bei Variation der installierten EE-Kapazitäten verändert und
- welcher Teil der zusätzlich erzeugten Energie überhaupt in den Speichern aufgenommen und nutzbar gemacht werden kann.

Um diesen Fragestellungen nachzugehen, wird in vier zusätzlichen Simulationen die installierte Leistung der Erneuerbaren variiert, um die Effekte auf Ausnutzung der H₂ Speicher und die resultierende EE-Deckungsrate zu untersuchen. Neben einer Reduktion auf 98% des im ISI Szenario unterstellten EE-Ausbaus werden die installierten Kapazitäten um je 2%, 5% und 10% angehoben. Diese Erhöhung bezieht sich auf alle Technologien außer der Wasserkraft, da hier die technischen Potenziale gemäß den Referenzszenarien bereits ausgeschöpft sind.

Ausgehend von einer bilanziellen Deckungsrate von 102,2% gemäß ISI Szenario, verändert sich diese in den neuen Simulationen auf 100,2% (-2% der EE Kapazitäten), 103,7% (+2%), 107,2% (+5%) bzw. 111,6% (+10%). Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Anstieg der EE-Kapazitäten

Installierte Leistung ¹	98% EE	100% EE	102% EE	105% EE	110% EE
resultierende bil. Deckungsrate	100,2%	102,2%	103,7%	107,2%	111,6%
Region	regioneninterne Deckungsrate [%]				
1. Ib. Halbinsel	97,3	98,9	99,7	100	100
2. Westeuropa	93,1	95,6	97,4	99,7	100
3. GB	96,4	97,8	99,1	100	100
4. Deutschland	91,3	94,2	96,4	99,4	100
5. Skandinavien	99	100	100	100	100
6. Osteuropa	91,1	93,7	95,6	98,5	99,95
7. Alpenraum	91	93	94,5	96,9	98,5
Gesamt	93,8	96,1	97,8	98,86	99,79

Tabelle 6: Deckungsraten bei Variation der EE-Einspeisung. ¹Bezogen auf die installierte Leistung im Referenzszenario

Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

auch die dynamische Deckungsrate steigt. In Tabelle 6 sind die resultierenden dynamischen Deckungsraten für die untersuchten Regionen aufgeführt. Dabei wird, wie bereits in Kapitel 4.2.1 erläutert, unterstellt, dass Energie, welche zum Ende des simulierten Jahres im Vergleich zum Jahresanfang zusätzlich in den H₂-Speichern gespeichert ist, in der dynamischen Deckungsrate berücksichtigt wird. Die Berechnungen zeigen, dass bei einer fünfprozentigen Erhöhung der installierten EE-Leistungen auch die Stromnachfrage in den Regionen 1 und 3 (Iberische Halbinsel und Großbritannien) zu jeder Stunde vollständig aus EE gedeckt werden kann. Bei einer Steigerung der EE-Leistung auf 110% des Referenzwertes kann auch in Westeuropa und Deutschland eine 100%-ige Deckungsrate erreicht werden. Lediglich Osteuropa und die Alpenregion bleiben mehr oder weniger knapp unter 100%, so dass in dem Fall insgesamt und europaweit mit rd. 99,8% eine nahezu vollständige Stromversorgung durch erneuerbare Energien erreicht werden kann.

Zu dem Anstieg der Deckungsrate in den Regionen führt jedoch nicht nur die Erhöhung der EE-Kapazitäten, sondern wie aus Abbildung 15 zu entnehmen ist, auch der mit zunehmender Einspeisung stark steigende Einsatz der H₂-Speicher. Diese Abbildung zeigt die relative Entwicklung der äquivalenten Volladezyklen aller berücksichtigten H₂-Speicher in den fünf Simulationen. Dabei beziehen sich die Angaben stets auf die Auslastung, welche im ISI-Szenario erreicht wurde (X- sowie Y Achse bei 100%). Am Beispiel des Speichers in Region 1 (ES/PT) zeigt sich anschaulich, dass bereits aus einer Erhöhung der EE-Kapazitäten um 5% eine Verdoppelung des Speichereinsatzes resultiert. Grundsätzlich stellt sich dieser Effekt bei allen Speichern ein. Es fällt jedoch auf, dass die Auslastung einiger Speicher mit ansteigender EE-Einspeisung auch wieder abnimmt. Es handelt sich dabei um alle Speicher, die in Überschussregionen (Regionen 1, 3 und 5) liegen. In Tabelle 6 ist zu erkennen, dass diese Regionen bereits bei 105% EE-Einspeisung eine vollständige Deckung der Stromnachfrage erzielen (in Region 5 bereits bei 100% (ISI)). Daher sinkt in diesen Regionen bei weiterer Erhöhung des EE-Angebots der lokale Ausgleichbedarf, der durch die H₂-Speicher gedeckt werden muss. Auch in den angrenzenden Regionen verringert sich durch den Anstieg der Stromerzeugung der Zeitraum, in dem Energie für die Deckung der Nachfrage aus den Speichern benötigt wird. Daher kann eine Stagnation bzw. ein Rückgang der Speicherauslastung beobachtet werden. Dass die Speicher weniger genutzt werden, obwohl in anderen Regionen noch keine vollständige Deckung erreicht wird, deutet auf die begrenzten Netzkapazitäten hin, die eine überregionale Flexibilisierung bei voller Auslastung verhindern.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass sich der Einsatz von großen H₂-Speichern für das Stromsystem insbesondere dann anbietet, wenn die erneuerbare Stromerzeugung die Stromnachfrage nahezu vollständig decken kann. Bei weniger ambitionierten EE-Anteilen im Stromsystem wirkt sich der betrachtete Einsatz von H₂-Speichern aufgrund der niedrigen Wirkungsgrade eher negativ auf das Gesamtsystem aus bzw. es kommt nur in sehr geringem Umfang zum Einsatz der H₂-Speicher. Ferner zeigt sich, dass der Nutzen von Speicherpotenzialen in starkem Zusammenhang mit den in der Region befindlichen EE-Potenzialen und der vorliegenden Stromnachfrage steht und dass selbst der hier angenommene, sehr ambitionierte Netzausbau diese räumlichen Zusammenhänge in Europa nicht gänzlich aufheben kann. Daher bildet der regionale Speicherbedarf die wesentliche Orientierungsgröße für die Erschließung der in der Region vorhandenen technischen H₂-Speicherpotenziale. Überregionale Ausgleichsbedarfe stellen nur bei sehr starkem Netzausbau einen zusätzlichen Treiber für den H₂-Speicherausbau dar.

Bei der „richtigen“ Erschließung der H₂-Speicherpotenziale ist jedoch neben dem realisierbaren regionalen Deckungsgrad bezogen auf den Strombedarf auch der (zunehmende) Beitrag zur Versorgungssicherheit durch den Speicherausbau zu berücksichtigen. Dies ist im Hinblick auf die sehr starken Fluktuationen in Stromsystemen mit nahezu 100% EE ein sehr relevanter Synergieeffekt.

Die den beiden RESTORE2050 Vorhaben zugrundeliegenden Szenarien und die daraufhin durchgeführten Analysen beziehen sich bisher nur auf die konventionelle Stromnachfrage im Jahr 2050.

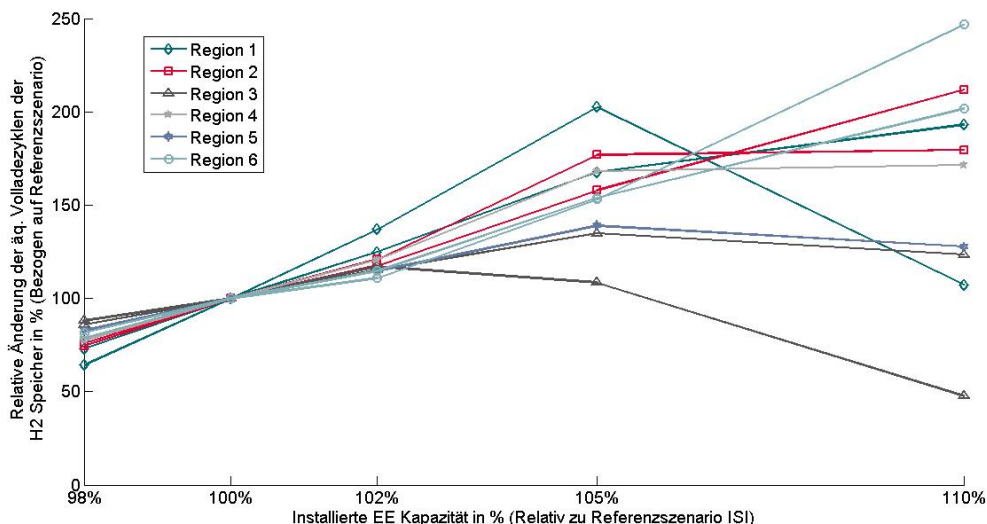


Abbildung 15: Änderungen der äquivalenten Vollladezyklen der einzelnen H2-Speicher in Abhängigkeit des EE-Angebots. (In Region 7 sind keine H2-Speicher unterstellt)
 Datenbasis: Modellberechnungen RESTORE2050_plus

Dazu gehören neben den heute üblichen Anwendungen (außer den sogenannten Nachtspeicherheizungen) insbesondere auch Elektro-PKW und Wärmepumpen. Diese werden in 2050 in wesentlich breiterem Umfang als heute genutzt und erreichen damit Anteile von 21 bzw. 6% an der Stromnachfrage. Die Berücksichtigung ihrer Nachfrage deckt damit jedoch allenfalls einen Teil der möglichen sektorübergreifenden Strom- bzw. H2-Nachfrage ab. Für eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems, die spätestens seit dem Pariser Klimagipfel Ende 2015 als neues (langfristiges) Leitziel gilt, wird es dagegen nötig, insbesondere auch den Industriesektor und die anderen Verkehrsträger auf erneuerbar erzeugte Energie umzustellen. Eine solche Dekarbonisierung des Energiesystems führt im Vergleich zu den betrachteten Szenarien zu einer weitaus größeren Nachfrage an EE-Strom, EE-Wasserstoff und ggf. auch Folgeprodukten wie z.B. EE-Methan. Der sektorenübergreifend benötigte EE-Wasserstoff betrüge beispielsweise nach den parallelen Analysen von Next Energy [Vogt et al., 2016a] zwischen etwa 785 und rd. 2150 TWh_{th}. Der Industriesektor hätte daran mit einem H2-Bedarf zwischen gut 600 und ca. 1265 TWh_{th} den weitaus größten Anteil. Aus diesem zusätzlichen Bedarf an Wasserstoff resultiert ein zusätzlicher Strombedarf in Höhe von etwa 935 bis rd. 3980 TWh_{el}, für dessen Deckung die installierte Leistung in EE-Anlagen deutlich (um einen Faktor 1,3-2,2 im Vergleich zum ISI-Referenzszenario, siehe oben) gesteigert werden müsste.

Die zuvor dargestellte Abnahme des Einsatzes der H2-Speicher bei steigenden EE-Kapazitäten träte daher vermutlich erst bei wesentlich größerer EE-Einspeisung ein. Um diese Effekte unter Berücksichtigung regionaler Zusammenhänge darstellen zu können, sind daher weiterführende Analysen nötig, die eine möglichst umfassende sektorübergreifende Nutzung von Wasserstoff und Folgeprodukten vor allem in der Industrie und im Verkehr abbilden. Dabei sind dann ferner die folgenden Punkte zu berücksichtigen, insbesondere dass

- die H2-Speicher dann nicht mehr (wie hier bisher) ausschließlich zur Rückverstromung des erzeugten Wasserstoffs (Power-to-Power Fall), sondern vermutlich viel stärker im Sinne von Power-to-Gas bzw. Power-to-X Prozessketten eingesetzt werden. Dies wird voraussichtlich neue, hybride Einsatzstrategien erfordern. Zudem wird der Wasserstoff dann nicht mehr in gleichem Umfang wie zuvor für das Stromsystem zur Verfügung stehen, mit möglichen Rückwirkungen auf die Versorgungssicherheit bzw. den Bedarf an backup-Kraftwerken.

- sich die Lastprofile durch die anwendungsspezifischen H₂-Nachfragen signifikant ändern werden. Dabei ist zu erwarten, dass die Grundlastanteile aufgrund der betriebswirtschaftlichen Logik einer möglichst hohen Auslastung steigen werden.
- sich durch die o.g. Punkte der Flexibilitäts- und Speicherbedarf grundlegend ändern und vermutlich deutlich steigen wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorangegangenen Forschungsprojekt RESTORE2050 führte der systemdienliche Einsatz von Wasserstoffspeichern zur Residuallastglättung zu einer Absenkung der Deckungsraten von Erneuerbaren Energien (EE) im europäischen Stromsystem. Daher wurde im Rahmen dieses Aufstockungsprojektes (RESTORE2050_plus) untersucht:

- wie der Einsatz von Wasserstoff-(H₂)-Speichern besser und realitätsnäher im Rahmen des RESTORE2050 Modells abgebildet werden kann, und
- wie der systemdienliche (leistungsbezogene) Einsatz im Vergleich zum energetisch optimalen Einsatz (maximale Aufnahme von EE-Überschussstrom) abschneidet.

Zur Beantwortung dieser Fragen und um aufzuzeigen, welchen Beitrag alternative H₂-Speichereinsatzstrategien zur Minimierung der negativen Residuallast und zugleich zur Erhöhung der EE-Versorgungsanteile leisten kann, wurden:

- zunächst ex-post Analysen auf Basis der zuvor in RESTORE2050 durchgeführten Modellrechnungen und Ergebnisse und daran anschließend
- neue, zusätzliche Modellrechnungen mit angepasster Einsatzstrategie mit dem RESTORE2050 Optimierungsmodell durchgeführt.

Darüber hinaus wurden weitere Fragestellungen bearbeitet, die sich bei der näheren Untersuchung des europäischen Energiesystems ergaben. In diesen Exkursen wurde untersucht,

- wie sich beispielhaft der Aufbau einer H₂-Pipeline zwischen Skandinavien und Deutschland auf die Deckungsrate in Deutschland und die bereits identifizierten Stromnetzengpässe auswirkt.
- Zudem wurde die Auslastung der H₂-Speicher bei Variation der installierten Erneuerbare Energien-Kapazitäten bis hin zu einer vollständigen EE-Deckung der Stromnachfrage untersucht.

6.1 Ergebnisse der ex-post Analysen

Mit den ex-post Analysen wurde für jede der sieben betrachteten Regionen in Europa untersucht, in welchem Umfang die ermittelten H₂-Speicherpotenziale für den zeitlichen Ausgleich (Speicherung und spätere Rückverstromung) der verbleibenden EE-Stromüberschüsse (d.h. nach systemdienlichem Einsatz aller übrigen Speichertechnologien und Netzaustausch) genutzt werden können. Die Untersuchung beschränkt sich dabei aus methodischen Gründen auf die rein regioneninterne Nutzung der Überschüsse, welche aus unterschiedlichen Simulationskonfigurationen (also unterschiedliche Netzausbauzustände und Speicherpotenziale) resultieren. Eine Neuberechnung der Netzflüsse, also der Einfluss von H₂ Speichern auf den überregionalen Netzaustausch kann hierdurch nicht bewertet werden.

Die Ergebnisse fallen aufgrund der unterschiedlichen regionalen Verteilung der EE-Überschussmengen und H₂-Speicherpotenziale sowie je nach Szenario in Teilen sehr unterschiedlich aus. Europaweit kommt es durch den (lokalen) ex-post Einsatz der H₂-Speicher insgesamt zu einer zusätzlichen Nutzung von ca. 50% der europaweit noch vorhandenen EE-Stromüberschüsse in den Szenarien mit Basis-Netzausbau. Dabei bleibt jedoch ein sehr großer Teil der verfügbaren Speicherkapazitäten noch ungenutzt. Ein solcher, ausschließlich regionaler Einsatz der H₂-Speicher ist aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Verteilung von Kavernenpotenzial und Erzeugungsschwerpunkten daher nur bedingt sinnvoll.

Ferner zeigt sich, dass die lokalen H₂-Speicherpotenziale in den Überschussregionen i.d.R. nicht ausreichen, um die großen EE-Überschüsse aufzunehmen. Je nach verwendetem Szenario stellt sich dieser Effekt in den Regionen ein, die über die größten installierten EE-Leistungen verfügen. Im windstarken ISI Referenz-Szenario reichen die H₂ Speicherpotenziale in Großbritannien nicht aus, um alle Überschüsse aufzunehmen. Im GP/EREC Referenz-Szenario tritt dieser Fall dagegen auf der iberischen Halbinsel auf, wo sehr große PV-Kapazitäten unterstellt werden. Szenariounabhängig können die Speicherpotenziale in der Region Skandinavien nicht alle Energieüberschüsse, die dort auftreten, aufnehmen. Die Analysen auf Basis der Simulationen mit unterschiedlichem Netzausbau zeigen, dass dieser zwar einen großen Einfluss auf die lokalen Überschüsse und die residualen Lasten hat, der Effekt jedoch selbst durch den maximalen Netzausbau nicht gänzlich vermieden werden kann.

In den Defizitregionen (Westeuropa, Deutschland, Osteuropa und die Alpenregion) hingegen können die lokal auftretenden Überschüsse zwar weitgehend nutzbar gemacht werden, allerdings werden dadurch nur Bruchteile der H₂-Speicherpotenziale genutzt (jeweils weniger als 10% der möglichen Speicherkapazität). Eine regional beschränkte Einsatzstrategie der Wasserstoffspeicher ist folglich aufgrund der räumlichen Entfernung zwischen der Entstehung von Stromüberschüssen und den Nachfragezentren nicht sinnvoll. Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich der überregionale Ausgleichseffekt, welcher sich durch den maximalen Netzausbau ergibt, größer ist, als der durch lokalen Einsatz der H₂ Speicher erzielt werden kann.

6.2 Exkurs: Wasserstoff Direktübertragung zwischen zwei Regionen (Deutschland und Skandinavien)

In einer stark vereinfachten Berechnung wurde geprüft, welche Auswirkungen eine direkte Übertragung von Wasserstoff zwischen Skandinavien und Deutschland auf die deutsche EE-Deckungsrate bzw. auf die dort verfügbaren Wasserstoffmengen hat. Dies ist vor allem als Vergleich zu dem alternativ nötigen, intensiven Netzausbau sowie vor dem Hintergrund möglicher Sektorenkopplung interessant. Die Untersuchung hat lediglich einen beispielhaften Charakter, um darzustellen, welche Übertragungsleistungen für eine Wasserstoffübertragung notwendig sind.

Dazu wurde unterstellt, dass alle EE-Überschüsse, die in den betrachteten Speichern in Skandinavien nicht oder nur zeitweise aufgenommen werden können, mittels einer Wasserstoff Pipeline direkt exportiert werden. Durch die Nutzung der großen H₂-Speicherpotenziale in Deutschland wurden diese Energiemengen dann flexibel zur Rückverstromung eingesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die sich ergebende nötige Übertragungsleistung für den EE-Wasserstoff in der Größenordnung bereits bestehender Pipelines (Nordstream) liegt (ca 50 GW_{th} ohne, bzw. ca. 6 GW_{th} mit Zwischenspeicherung in Skandinavien). Für eine nahezu vollständige Verwertung der Stromüberschüsse in der Region sind jedoch sehr hohe Elektrolyseleistungen bis zu 58 GW_{el} (Maximalwert) in Skandinavien notwendig.

Die H₂-Speicher in Deutschland werden auch durch das Zuführen der H₂-Mengen aus Skandinavien nur geringfügig stärker ausgelastet, da die importierte Energie in der Regel zeitnah rückverstromt werden kann, um die verbleibende residuale Stromnachfrage zu decken.

6.3 Überregionaler Einsatz der H2 Speicher

In dieser Teiluntersuchung, welche als zentrale Arbeit des Aufstockungsprojektes anzusehen ist, konnte aufgrund der erfolgreichen Erweiterung des RESTORE2050 Modells das Zusammenspiel von Übertragungsnetz, konventionellen Speichern (z.B. PSW und Saisonalspeichern) und H2-Speichern regionenübergreifend analysiert werden.

Es zeigte sich, dass der angepasste, nicht mehr rein auf die Residuallastglättung ausgerichtete Einsatz von Wasserstoffspeichern grundsätzlich zu einer Erhöhung der EE-Deckungsrate führt. Das Teilziel, die Einsatzstrategie in dem verwendeten Simulationsmodell im Hinblick auf einen technisch sinnvollen Einsatz entscheidend zu verbessern, konnte folglich erreicht werden.

Trotz des unterstellten sehr ambitionierten Netzausbaus werden die H2-Speicherpotenziale in Europa jedoch nur begrenzt eingesetzt. Wie bereits in der ex-post Analyse festgestellt, ist die überregionale Stromübertragung als Schlüsseltechnologie für eine erfolgreiche Einbindung der großen Speicherpotenziale anzusehen. Da der unterstellte Netzausbau in den Analysen bereits als sehr ambitioniert zu bezeichnen ist, die H2-Speicher in der vereinfachten Netzausbauplanung jedoch (noch) keine Berücksichtigung fanden, ist zu empfehlen **die lokalen Speicherpotenziale künftig als Bestandteil einer integrierten und europaweiten Netz- und EE-Ausbaustrategie einzubeziehen.**

Der kurzfristige Flexibilitätsbedarf in den untersuchten Regionen kann auch durch den Einsatz der H2-Speicher gemindert werden. Kurzzeitspeicher (wie z.B. Pumpspeicher) können die gespeicherte Energie folglich länger vorhalten und steigern somit die Versorgungssicherheit. Die Lastwechsel der Kurzzeitspeicher sinken bei insgesamt stärkerer Auslastung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die H2-Speicher in den Überschussregionen mehr Energie zeitlich flexibilisiert und den Defizitregionen über längere Zeiträume zugeführt werden kann. Die ohnehin stark ausgelasteten Netzkuppelstellen, welche die Überschussregionen mit den Nachfragezentren verbinden, werden so stärker ausgelastet. **Die H2-Speicher stellen dabei die nötige Flexibilität für dieses „Engpassmanagement“ zur Verfügung.**

Wie bereits im RESTORE2050 Projekt dargestellt, sind Flexibilitätspotenziale im Bereich der saisonalen Wasserspeicher im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen nicht vollständig erschlossen. Aufgrund der hohen Effizienz von Pumpspeicherkraftwerken sollte vor dem Aufbau von H2-Speicherkapazitäten zunächst untersucht werden, ob die großen Speicherwasserkraftwerke zusätzlich mit Pumpen zur aktiven Energiespeicherung erweitert werden können. Die großen Wasserreservoirs z.B. im Alpenraum wurden zwar berücksichtigt, jedoch verfügen diese in den Untersuchungen noch über keine Pumpfunktion und werden lediglich durch natürlichen Zufluss durch Flüsse und Schneeschmelze befüllt. **In weiteren Untersuchungen sollte daher analysiert werden, wie groß diese Potenziale sind und welcher energetische Vorteil sich durch die priorisierte Nutzung dieser, im Vergleich zu H2-Speichern, effizienten Technologie erzielen lässt.**

6.4 Exkurs: Variation der installierten EE-Kapazitäten

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung wurde abschließend analysiert, welche EE-Leistungen für eine 100%-ige Deckung zusätzlich benötigt würden und wie sich dadurch der Einsatz der H2-Speicher ändert. Dies ist auch im Hinblick auf eine stromgetriebene Dekarbonisierung anderer Sektoren wie Industrie und Verkehr im Sinne der Sektorenkopplung interessant. Daher wurden vier weitere Simulationen durchgeführt, in der die installierten EE-Kapazitäten (Wasserkraft ausgenommen) auf 98%, 102%, 105% und 110% der gemäß Referenzszenario ISI angegebenen Leistung skaliert wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz der H2-Speicher, in Form von äquivalenten Volla-

dezyklen, bei Erhöhung der EE-Einspeisung zunächst stark ansteigt und dass in diesem Rahmen (EE-Erhöhung und H2-Speicher) europaweit eine Deckungsrate von nahezu 100% erreicht werden kann. Bei 105% bzw. 110% EE (ISI) zeigen einige der Speicher jedoch bereits wieder eine geringere Auslastung als zuvor mit 100% bzw. 102% EE (ISI). Da es sich dabei ausschließlich um Speicher in Überschussregionen handelt, deren regionale dynamische Deckungsrate bereits bei 100% liegt, ist dies nachvollziehbar, da der lokale zeitliche Flexibilitätsbedarf gedeckt ist. Bei weiterer Erhöhung der EE-Stromerzeugung nehmen die Zeiten mit noch zu deckender residueller Last weiter ab, sodass weniger Überschussstrom zeitlich verlagert werden muss. Die Vollladezyklen der H2-Speicher sinken. Folglich ist der regionale H2-Speicherbedarf stark vom Verhältnis der installierten EE-Kapazitäten zur regionalen Stromnachfrage abhängig. Diese Abhängigkeit nimmt mit zunehmenden Kuppelkapazitäten zu anderen Regionen ab, da Ausgleichsbedarf auch von Speichern anderer Regionen bedient werden kann.

Für eine nahezu vollständige Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems, insbesondere des Industrie- und Verkehrssektors auf Basis von EE-Strom, -Wasserstoff und den nötigen synthetischen strombasierten Folgeprodukten wird die betrachtete Steigerung der EE-Erzeugungskapazitäten jedoch bei weitem nicht ausreichen. Der Bedarf an und der Einsatz von H2-Speichern wird dadurch erheblich an Bedeutung gewinnen und vermutlich eine zentrale Rolle für die sektorenübergreifende Dekarbonisierung einnehmen. Eine solche Dekarbonisierung wird jedoch zu vielfältigen neuen Rückwirkungen auf das Strom- und Speichersystem führen, die durch weiterführende Analysen zu bestimmen und bewerten sind.

6.5 Ausblick

Mit den zuvor dargestellten, zusätzlichen Analysen auf der Basis des RESTORE2050 Forschungsvorhabens konnte gezeigt werden, dass die betrachteten Wasserstoffspeicher bei angepasster Einsatzstrategie zu einer deutlich höheren Aufnahme von regionalen EE-Stromüberschüssen führen und eine entscheidende Rolle spielen, um eine (nahezu) 100%-ige erneuerbare Stromversorgung in Europa zu erreichen. Diese Ergebnisse beschränken sich bisher allerdings auf eine ausschließliche Nutzung des EE-Wasserstoffs zur Rückverstromung und eine anteilige Berücksichtigung von sektorenübergreifender Dekarbonisierung in Form von Elektro-PKW und Wärmepumpen. Daher sind aus Sicht der Bearbeiter weiterführende Analysen mit einer zeitlich aufgelösten, sektorübergreifenden H2-Nachfrage nötig, um die Relevanz der H2-Erzeugung, -Speicherung und -Umwandlung vor dem Hintergrund der Dekarbonisierung des Gesamtenergiesystems unter den aktuellen klimapolitischen Randbedingungen bewerten zu können.

Die Untersuchungen zeigen ferner, dass die Auslastung der lokalen H2-Speicherpotenziale maßgeblich von der regionalen sowie überregionalen Stromnachfrage, dem Verhältnis der Nachfrage zur lokalen EE-Erzeugung sowie vom Ausbauzustand der Übertragungsnetze abhängt. Um die europäischen Speicherpotenziale, deren Flexibilisierungspotenzial und den daraus resultierenden Zuwachs an Versorgungssicherheit effektiv einzusetzen, sollten der EE-Ausbau und der Übertragungsnetzausbau sowie die Erschließung von Speichern in einer gesamteuropäischen, integrierten Ausbau- und Einsatzplanung gegeneinander abgewogen werden. Die hier gezeigten Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei alleiniger (länderscharfer) Optimierung der EE-Ausbauplanung nicht die maximale Flexibilität im europäischen Stromsystem gewährleistet werden kann.

Literatur

- [Buddeke et al., 2016] Buddeke, M., Krüger, C., and Merten, F. (2016). Arbeitspaket 7: Modellbeschreibung: Einsatzmodell für Flexibilitätsoptionen im europäischen Stromsystem. Technical report, Wuppertal Institut. Teilprojektbericht im Verbundvorhaben RESTORE2050.
- [Buddeke and Merten, 2016] Buddeke, M. and Merten, F. (2016). Arbeitspaket 7: Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Einsatzmodell für Flexibilitätsoptionen im europäischen Stromsystem. Technical report, Wuppertal Institut. Teilprojektbericht im Verbundvorhaben RESTORE2050.
- [Nolden et al., 2016] Nolden, C., Slednev, V., Ardone, D. A., and Fichtner, P. W. (2016). ENTWICKLUNG DER STROMNETZE SOWIE DES KRAFTWERKSPARKS UND DES PTG-AUSBAUS BIS 2050 . Technical report, Karlsruher Institut für Technologie. Vortrag Konstgas Abschlussworkshop, Berlin.
- [Vogt et al., 2016a] Vogt, T., Klement, P., Meike Kuehne and, K. v. M., and Peters, D. (2016a). Power-to-X Konzepte und Technologien zur Integration erneuerbarer Erzeugungseüberschuesse – Schwerpunkt Wasserstoff ; Teilbericht D15 BMBF Forschungsprojekt RESTORE2050. Technical report, Next Energy.
- [Vogt et al., 2016b] Vogt, T., von Bremen, L., Buddeke, M., Heinemann, D., Kies, A., Kleinhans, D., Krüger, C., Merten, F., Preute, M., and Wienholt, L. (2016b). Ergebnisse und Handlungsempfehlungen- Abschlussbericht des BMBF-Forschungsprojektes - Regenerative Stromversorgung & Speicherbedarf in 2050 - RESTORE2050. Technical report, Next Energy, Wuppertal Institut, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- [von Bremen and Heinemann, 2016] von Bremen, L. and Heinemann, D. (2016). Statistische Auswertung der modellierten Einspeisezeitreihen von Solar und Wind im Jahr 2050 auf Basis von Referenzszenarien. Technical report, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- [Wienholt and Kleinhans, 2015] Wienholt, L. and Kleinhans, D. (2015). Arbeitspaket 6: “Stromspeicher” Charakterisierung und Quantifizierung des Stromspeicherpotentials für Europa. Technical report, NEXT ENERGY. Teilprojektbericht im Verbundvorhaben RESTORE2050.