

Die Erhöhung des Wertes erneuerbarer Einspeisung durch Pumpspeicherkraftwerke

Thomas Nacht, Heinz Stigler

*Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz, Inffeldgasse 18
8010 Graz, Tel: 0316 873-7911, thomas.nacht(at)tugraz.at**

Kurzfassung:

IN dieser Arbeit wird am Beispiel von Deutschland untersucht welche Auswirkungen ein koordinierter Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken in Kombination mit Einspeisung aus erneuerbaren Quellen hat. Es wird analysiert inwieweit sich der Wert erneuerbarer Erzeugung steigern lässt. Dabei wird der Pumpspeicher so betrieben, dass er die gespeicherte Energie dafür verwenden muss, die resultierende Last als Differenz zwischen tatsächlicher Last und der erneuerbaren Einspeisung unter Berücksichtigung des Pumpspeichereinsatzes, mit welcher der thermische Kraftwerkspark beaufschlagt wird, zu jedem Zeitpunkt des Jahres unter einer definierten Grenze (obere Restlastgrenze) zu halten. Es wird ermittelt, welche Speicherkapazität bei gegebener erneuerbarer Einspeisung und definierter Last notwendig ist, um diese Aufgabe zu erfüllen. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen erneuerbaren Erzeuger zu ermöglichen, wird die erneuerbare Einspeisung ins System ausschließlich aus entweder Windkraft, PV oder Laufwasserkraft (welche in Form von Einspeisezeitreihen mehrerer Jahre vorliegen) bereitgestellt. Ebenso wird analysiert, welchen Beitrag Erneuerbare für die notwendige Lastreduktion zur Einhaltung der Restlastgrenze sowie zur Deckung der Jahreshöchstlast leisten und welcher Anteil der im Speicherkraftwerk gespeicherten Energie aus erneuerbaren Quellen stammt und zur Lastreduktion verwendet werden kann. Anhand dieser Untersuchung soll sich eine Wertsteigerung der erneuerbaren Einspeisung durch eine Kombination mit Pumpspeicherkraftwerken ableiten lassen.

Keywords: Energiespeicher, Pumpspeicherkraftwerke, Erneuerbare Einspeisung, volatile Erzeugung

*oder Nacht_Thomas(at)gmx.at

1 Hintergrund und Einleitung

Die Elektrizitätswirtschaft Europas zeichnet sich derzeit durch das Bestreben aus, den regenerativen Anteil zur Deckung des Stromverbrauchs zu erhöhen. Aus dieser Situation resultiert, dass ein immer größer werdender Anteil der Erzeugung nicht mehr dem Bedarf folgt, sondern dem Dargebot des Primärenergieträgers. Aufgrund der Dargebotsabhängigkeit und der damit verbundenen Erzeugungscharakteristik kommt es zu einer zeitlichen Entkopplung zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsschwerpunkt. Auch ist der gesicherte Beitrag regenerativer Erzeugung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast gering in Bezug auf die installierte Leistung. Ein wertvolles Werkzeug im Umgang mit den erneuerbaren Energien sind Pumpspeicherkraftwerke (PSKW). Diese werden derzeit nach einem gewinnmaximierenden Prinzip eingesetzt, um kostengünstigen Niederlaststrom zu speichern, und diesen zu Hochlastzeiten zu verkaufen.

In dieser Arbeit wird eine alternative Herangehensweise für die Pumpspeicherbewirtschaftung gewählt. Das Ziel ist es, durch einen koordinierten Einsatz von PSKW eine festgelegte obere Restlastgrenze während des gesamten Jahres nicht zu überschreiten. Unter der Restlastgrenze ist jener Lastwert zu verstehen, den der thermische Kraftwerkspark decken muss. Also die tatsächliche Last durch die Verbraucher abzüglich der erneuerbaren Einspeisung und unter Berücksichtigung des PSKW-Einsatzes. Dadurch sollen in weiterer Folge Verbrauchsspitzen abgefangen und der Bedarf an Spitzenlastkraftwerken reduziert werden. Für diese Lastreduktion soll nach Möglichkeit sehr viel erneuerbare Energie verwendet werden. Da diese aber zu den Zeitpunkten, an denen die Lastreduktion notwendig ist, nicht mit Sicherheit vorhanden ist, muss sie in einem PSKW zwischengespeichert und bei Bedarf abgegeben werden. Es folgt daraus eine zeitliche Verlagerung der erneuerbaren Einspeisung vom Zeitpunkt der Erzeugung, bei dem sie unter Umständen nicht gebraucht wird, hin zum Zeitpunkt an dem sie einen höheren Nutzen aufweist. Es kommt somit zu einer Wertsteigerung der erneuerbaren Einspeisung.

Da sich die einzelnen erneuerbaren Erzeugungstypen von ihrer Verlaufscharakteristik her unterscheiden, ist es für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sinnvoll sie getrennt voneinander zu analysieren. Dabei werden die notwendigen Pumpspeicherkapazitäten, der Beitrag durch direkte und indirekte Einspeisung Erneuerbarer zur Lastreduktion, sowie deren Beitrag zur Deckung der Jahreshöchstlast miteinander verglichen. Die indirekte Einspeisung ist jener im PSKW im Becken vorhandene Anteil regenerative Einspeisung der zuvor gepumpt, und im Bedarfsfall wieder abgegeben wird.

2 Methodik

Die Bestimmung der Auswirkungen einer Kombination aus koordiniertem PSKW-Einsatz und erneuerbarer Einspeisung gliedert sich im Wesentlichen in die Ermittlung der erneuerbaren Einspeisung auf Basis von Zeitreihen des Primärenergieträgers und Optimierungen und Berechnungen in GAMS und Excel.

2.1 Ermittlung der erneuerbaren Einspeisung

Für die Speichergrößenermittlung wird das System mit zwei unterschiedlichen Anteilen erneuerbarer Erzeugung am Gesamtstrombedarf beaufschlagt. Damit wird eine Vergleichbarkeit der Auswirkungen durch einen koordinierten PSKW-Einsatz in Kombination mit erneuerbarer Einspeisung auf einen niedrigen und einen hohen Durchdringungsgrad erneuerbarer Einspeisung ermöglicht. In beiden Fällen wird der Verbrauch von 2010 als Basis für die weiteren Berechnungen herangezogen. Die Anteile der erneuerbaren Einspeisung am Gesamtstrombedarf beziehen sich ebenfalls auf das Jahr 2010. Unterschieden wird zwischen einer Betrachtung mit geringem (Erzeugung entspricht 5% des Verbrauchs, etwa 27 TWh) und einer mit hohem Anteil (Erzeugung entspricht 35%, etwa 187 TWh) erneuerbarer Erzeugung. Um einen Vergleich der einzelnen regenerativen Erzeugungsquellen anstellen zu können, wird angenommen, dass die Einspeisung jeweils ausschließlich aus einer der Quellen erfolgt. Für die Berechnungen und Optimierungen wird ein stundenscharfer Ansatz gewählt, um die Volatilität der dargebotsabhängigen Erzeugung ausreichend genau darzustellen. Die Ermittlung der regenerativen Erzeugung erfolgt anhand stündlicher, bzw. wenn nicht anders vorhanden, anhand von Tagesmittelwerten des jeweiligen Primärenergieträgers. Für Windgeschwindigkeit (DWD, 2012b), für Durchfluss (LFU, 2013) und (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), 2013) sowie (Ruhrverband, 2013) und Globalstrahlung (DWD, 2012a) stehen Messreihen über mehrere Jahre zur Verfügung. Anhand dieser Daten werden mit geeigneten Modellen, auf Basis von (Nacht und Stigler, 2013), (Schüppel, 2010) sowie (Pattis, 2012) die jeweiligen stundenscharfen Einspeisung errechnet. Daraus resultieren je regenerativem Erzeugungstyp und gegebener installierter Leistung mehrere stundenscharfe Zeitreihen für die Einspeisung. Für Windkraft stehen Daten aus 32 Jahre, für Photovoltaik Daten aus 27 Jahren und für Wasserkraft Daten aus 11 Jahren zur Verfügung.

Um die zugrundeliegenden installierten Leistungen ermitteln zu können werden Volllaststundenzahlen für die einzelnen Erzeuger festgelegt. Die angenommenen Volllaststunden für den Fall mit 5% basieren auf den Modellkalibrierungen für das Jahr 2010. Für den Fall mit einem Anteil von 35% wird auf die Daten aus dem Netzentwicklungsplan Strom (NEP, 2012) zurückgegriffen. Anhand der Vorgaben für die jährliche Erzeugung ergeben sich die in Tabelle 1 angeführten Leistungen. Die starke Erhöhung der Volllaststunden bei der Windkraft lässt sich durch den erhöhten Anteil der Off-Shore Windkraft erklären. Als Basis für die Anlagenstandorte dienen Daten aus dem Jahr 2010, deren installierte Kapazität gemäß den zu erreichenden installierten Leistungen und unter Berücksichtigung der zu erreichenden Volllaststunden hochskaliert

Tabelle 1: Installierte Leistungen und Volllaststunden für 5% und 35% erneuerbaren Anteil am Jahresstromverbrauch

	5% erneuerbarer Anteil		35% erneuerbarer Anteil	
	P_{INST} [GW]	$t_{VOLLAST}$ [h]	P_{INST} [GW]	$t_{VOLLAST}$ [h]
Windkraft	16,5	1630	72,8	2580
Laufwasserkraft	6,4	4200	mangelndes Potential	
Photovoltaik	36,9	730	207,7	900

wurden. Das Potential für Laufwasserkraft in Deutschland ist nicht annähernd hoch genug um einen Anteil von 35% des Jahresstrombedarfs zu decken, deshalb wird die Laufwasserkraft für diese Betrachtung vernachlässigt. Das Resultat der Modelle für die erneuerbare Einspeisung sind Zeitreihen bestehend aus 8760 stündlichen Einspeisewerten für Windkraft (32 Zeitreihen), Photovoltaik (27 Zeitreihen) und Laufwasserkraft (11 Zeitreihen).

2.2 Modellierung des Pumpspeichereinsatzes

Für die Berechnungen und Optimierungen muss zwischen den folgenden Begriffen unterschieden werden:

- Residuallast:

$$P_{RESIDUAL}(t) = P_{LAST}(t) - P_{ERNEUERBAR}(t)$$

- Restlast:

$$P_{REST}(t) = P_{LAST}(t) - P_{ERNEUERBAR}(t) + P_{PUMP}(t) - P_{TURBINE}(t)$$

In weiterer Folge wird zwischen zwei unterschiedlichen Einsatzstrategien für die PSKW differenziert. Beide Strategien haben als oberste Prämisse, dass die Restlast nie einen Maximalwert überschreiten darf. Dieser wird in weiterer Folge als obere Restlastgrenze bezeichnet und in einem %-Anteil der maximalen Jahreshöchstlast angegeben. Die obere Restlastgrenze definiert den Schwellwert ab wann der Pumpspeicher in den Turbinenbetrieb gehen muss. Dabei muss die Residuallast durch die Turbine auf die Restlastgrenze reduziert werden. Der Unterschied der beiden Strategien ergibt sich aus der Entscheidung, zu welchen Zeitpunkten gepumpt werden darf. Die erste der beiden betrachteten Einsatzstrategien (ES1) erlaubt es dem PSKW zu jedem beliebigen Zeitpunkt in den Pumpbetrieb zu gehen, selbst wenn zu dem entsprechenden Zeitpunkt die Residuallast einen verhältnismäßig hohen Wert aufweist. Die Einsatzstrategie 2 (ES2) unterscheidet sich im Vergleich zur ES1 dadurch, dass hier neben der oberen auch eine untere Restlastgrenze festgelegt wird. Sobald die Residuallast diese Grenze unterschreitet, wird der Pumpbetrieb aktiviert. Damit soll die ES2 in gewisser Weise den heutigen Einsatz von PSKW unter der Prämisse der Einhaltung einer oberen Restlastgrenze widerspiegeln. Die Funktionsweise der beiden Einsatzstrategien ist in Abbildung 1 dargestellt. Für alle Berechnungen wird die Annahme getroffen, dass es sich

bei dem ermittelten Pumpspeicher um einen einzelnen Großspeicher handelt, desweiteren werden Netzrestriktionen vernachlässigt.

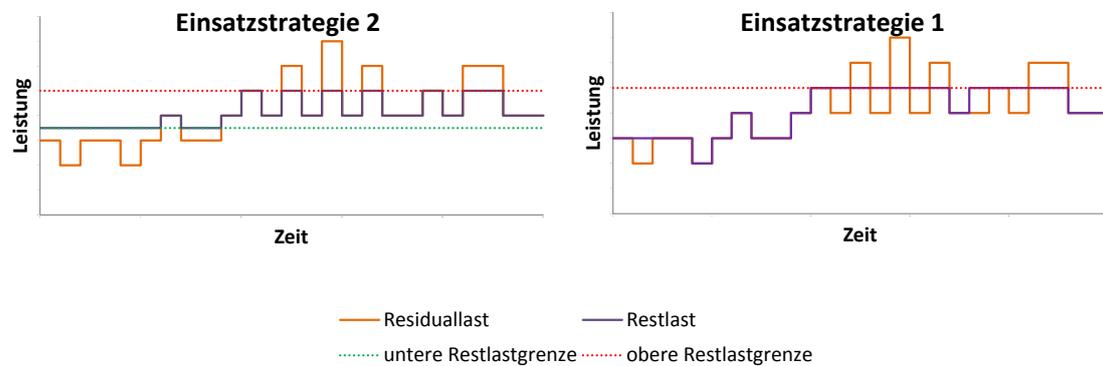


Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise der Pumpspeichereinsatzstrategien, ES1 (rechts), ES2 (links)

Die unterschiedlichen Einsatzstrategien benötigen für die Einhaltung der gleichen Restlastgrenze unterschiedliche Speicherinhalte. Um für die weiteren Untersuchungen sinnvolle Werte für die maximale Pumpspeicherkapazitäten zugrunde zu legen, werden vier Ausbaupotentiale in Betracht gezogen (Tabelle 2). Diese basieren auf einer Potentialstudie für den Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken in Europa (Gimeno-Gutiérrez und Lacal-Arántegui, 2013).

Tabelle 2: Gewählte Pumpspeicherpotentiale

PSKW 1	40 GWh
PSKW 2	241 GWh
PSKW 3	533 GWh
PSKW 4	1.079 GWh

2.2.1 Ermittlung der maximalen Restlastgrenze

Die Bestimmung der erreichbaren Restlastgrenze bei gegebener maximaler Speicherkapazität ist ein iterativer Prozess. Bei diesem wird eine Restlastgrenze vorgegeben anhand derer die zur Einhaltung notwendige Speicherkapazität ermittelt wird. Danach wird überprüft ob die so berechnete Kapazität mit einem der Werte aus Tabelle 2 übereinstimmt. Für den Vergleich wird jeweils die maximale Speicherkapazität aus den entsprechenden Zeitreihen herangezogen. Sollte es zu keiner Übereinstimmung kommen wird die Restlastgrenze solange angepasst und weitere Berechnungen durchgeführt, bis es zu einer Übereinstimmung kommt. Daraus resultiert die erreichbare Restlastgrenze für die Kapazitäten aus Tabelle 2. Dieser Prozess wird für jeden

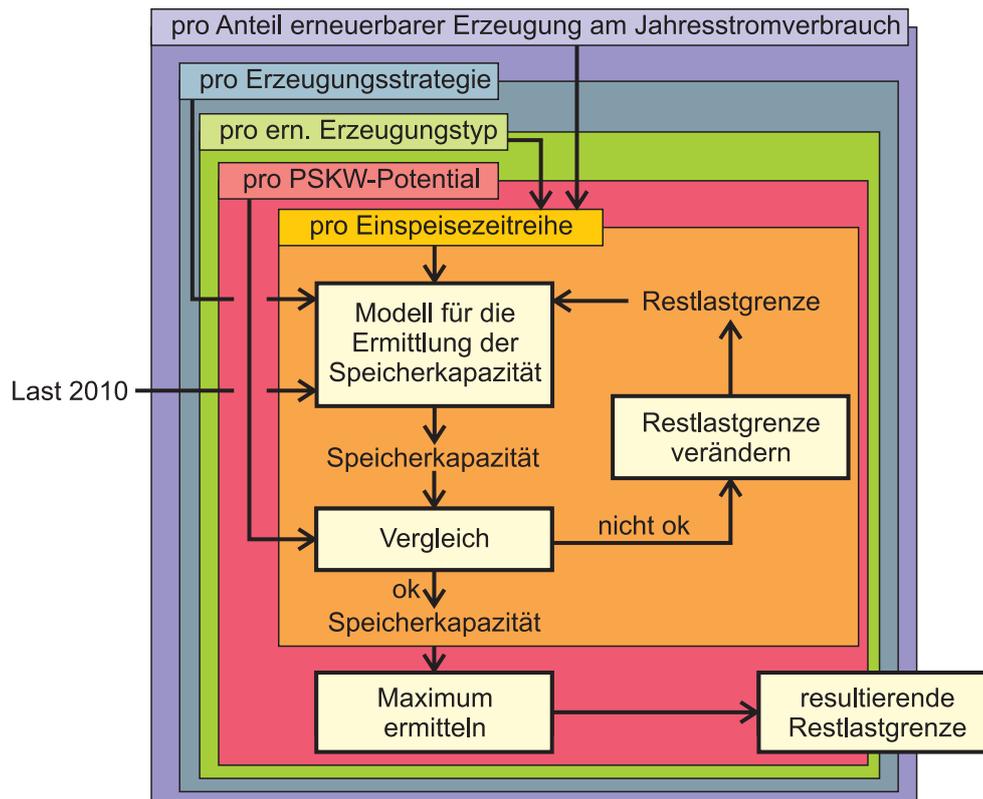


Abbildung 2: Prinzipieller Ablauf der Ermittlung der maximalen Restlastgrenze

erneuerbaren Erzeugungstypen, Anteil der erneuerbaren am Gesamtstromverbrauch sowie Erzeugungsstrategie durchgeführt (Abbildung 2).

Das Modell zur Bestimmung des minimal notwendigen Speicherinhaltes bei gegebener erneuerbarer Einspeisung sowie der gegebenen Last, wird in GAMS umgesetzt und besteht im Wesentlichen aus den folgenden Nebenbedingungen:

- Die Grenzen des Speicherinhaltes dürfen nicht überschritten werden.
- Die Summe der gepumpten Energie eines Jahres muss der Summe der turbinieren Energie eines Jahres entsprechen, dabei werden Pump- und Turbinenwirkungsgrade berücksichtigt.
- Die Restlast darf die Restlastgrenze unter keinen Umständen überschreiten.
- Im Fall der ES2 darf erst ab Unterschreitung der unteren Restlastgrenze durch die Residuallast ein Pumpbetrieb stattfinden.
- Im Fall der ES 1 wird sichergestellt, dass die Restlast mit der das thermische System beaufschlagt wird, möglichst kostengünstig gedeckt und dass möglichst viel erneuerbare Erzeugung verpumpt wird.

Das Ziel der Optimierung ist, es unter Einhaltung der Nebenbedingungen einen möglichst geringen Speicherinhalt zu ermitteln, wobei im Fall der ES1 eine geringere Speichergröße wichtiger als die Verpumpung erneuerbarer Energie ist. Bei einer hohen Durchdringungsrate erneuerbarer Einspeisung kann der Fall eintreten, dass die Residuallast über einige Stunden im Jahr negativ würde. Dabei kann es dazu kommen, dass der Energiebedarf für die Lastreduktion geringer ausfällt als der Energieinhalt der negativen Residuallasten. Wenn dies der Fall ist, ist es dem PSKW möglich, die Restlast unter die obere Restlastgrenze zu reduzieren um die negativen Residuallasten abzufangen. Dieser Effekt tritt vor allem bei hohen Durchdringungsraten sowie einer geringen oberen Restlastgrenze ein. Hier wird die ES2 die untere Restlastgrenze auf den Wert 0 gesetzt.

Die Ergebnisse aus der Restlastgrenzenermittlung bieten die Möglichkeit die beiden Einsatzstrategien sowie die unterschiedlichen erneuerbaren Erzeugungsarten miteinander zu vergleichen. Neben der Bestimmung der möglichen Restlastgrenze resultiert aus den Berechnungen ebenso die notwendige Pump- und Turbinenleistung für einen entsprechenden Betrieb der PSKW, auf die in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen wird.

2.2.2 Ermittlung der Auswirkungen einer Kombination von Pumpspeichern und erneuerbarer Einspeisung

Nach der Festlegung der bei gegebener Speichergröße möglichen Restlastgrenzen erfolgt eine Analyse über die direkte und indirekte Einspeisung der erneuerbaren Erzeugung. Dafür wird untersucht welchen Beitrag die volatile Erzeugung zur Lastreduktion hat und wie hoch der Anteil der regenerativen Einspeisung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast bemessen an der installierten Leistung ist. Die Herangehensweise dafür basiert auf einem ähnlichen Prinzip wie die Ermittlung der möglichen Restlastgrenze. Zur Optimierung des Einsatzes der PSKW wird die Software GAMS herangezogen. Das Ziel dieser Optimierung ist jenen Pump- und Turbineneinsatz zu ermitteln, der die Einhaltung der Restlastgrenze unter gleichzeitiger Einhaltung der vorhin definierten Speicherparameter (maximaler Speicherinhalt, maximale Pump- und Turbinenleistung) garantiert. Zusätzlich wird gewährleistet, dass sowohl Pump- als auch Turbinenbetrieb auf ein Minimum reduziert werden. Der Einsatz der Turbinen wird dabei durch die Restlastgrenze definiert. Der Betrieb der Pumpen wird durch die gewählte Einsatzstrategie vorgegeben. Bei der ES1 darf das Pumpspeicherkraftwerk die Pumpen jederzeit aktivieren. Berücksichtigt wird dabei lediglich, dass bevorzugt erneuerbare Erzeugung verpumpt werden soll. Da das Optimierungsmodell darauf achtet, die resultierenden Kosten (Erzeugungskosten des thermischen Kraftwerksparks) für die Deckung der Residuallast (Last abzüglich erneuerbarer Einspeisung unter Berücksichtigung des PSKW-Einsatzes) möglichst gering zu halten, kann es dazu kommen, dass auch thermische Energie verpumpt wird. Diese Situation kommt zustande, wenn in einem Zeitfenster in dem ein Pumpbetrieb notwendig ist, wenig erneuerbare Einspeisung vorhanden ist, oder die resultierenden Kosten geringer wären als zu einem Zeitpunkt mit höherer erneuerbarer Einspeisung und höherer Last. Diese Situationen

werden bei einer hohen Durchdringungsrate der erneuerbaren Erzeugung zusehends unwahrscheinlicher.

Für die ES2 wird ermittelt, welche Energie bei gegebener Last, einer Zeitreihe von erneuerbarer Erzeugung und ermittelter Restlastgrenze aus der notwendigen Lastreduktion resultiert. Anschließend wird die untere Restlastgrenze so lange erhöht, bis die resultierende gepumpte Energie gleich der benötigten turbinieren Energie (inklusive der jeweiligen Wirkungsgrade) ist. Bei beiden Einsatzstrategien kann es dazu kommen, dass sich aufgrund eines hohen Anteils erneuerbarer Erzeugung am Gesamtstrombedarf im System, die Residuallast über viele Stunden im Jahr negativ wird. In solch einer Situation wird wie bei der Restlastgrenzenermittlung vorgegangen und einer Reduktion der Restlast auch unter die Restlastgrenze zugelassen um das Gleichgewicht aus turbinierter und gepumpter Energie aufrecht zu erhalten und keine negativen Restlasten zuzulassen.

Nach der Optimierung des Einsatzes der PSKW wird der Anteil direkter und indirekter erneuerbarer Einspeisung zur Lastreduktion je erneuerbarer Einspeisezeitreihe ermittelt. Analysiert wird, welchen Anteil die direkte und indirekte erneuerbare Einspeisung an der für die Lastreduktion über das gesamte Jahr benötigten Energie hat. Dabei wird angenommen, dass bei einem Zeitpunkt an dem eine Lastreduktion zur Einhaltung der Restlastgrenze notwendig ist, die gesamte zu diesem Zeitpunkt vorhandene erneuerbare Erzeugung dafür herangezogen wird. Dieser Teil entspricht dann dem direkten Anteil der erneuerbaren Einspeisung. Die restliche für die Reduktion benötigte Leistung wird in weiterer Folge aus dem PSKW zur Verfügung gestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht die gesamte im PSKW gespeicherte Energie aus erneuerbaren Quellen stammen muss. Bei der Ermittlung des erneuerbaren Anteils im Speicher wird die in diesem Jahr dem Speicher zugeführte thermische und erneuerbare Energie miteinander verglichen. Es wird angenommen, dass das Verhältnis der über das Jahr gepumpten erneuerbaren zur thermischen Energie dem Verhältnis des Inhalts im Speicher zu Beginn des Jahres entspricht. Dieser Startwert wird über das Jahr durch den Pump- und Turbinierbetrieb weiter beeinflusst, wodurch zu jeder Stunde der Anteil erneuerbarer Energie im Speicher bekannt ist. Schematisch ist dieser Prozess in Abbildung 3 dargestellt. Wird Energie aus dem Speicher entnommen, teilt sich diese Energie gemäß des Verhältnisses in erneuerbare und thermische Anteile auf, der erneuerbare Anteil aus dem Speicher entspricht dabei dem indirekten Beitrag der erneuerbaren Erzeugung. Aus dem direkten und indirekten Anteil ergibt sich in weiterer Folge der Gesamtbeitrag der erneuerbaren Einspeisung zur Lastreduktion. Über das Jahr aufsummiert ergibt sich der erneuerbare Anteil am Energiebedarf zur Lastreduktion

Neben dem Beitrag zur Lastreduktion werden die Erneuerbaren noch hinsichtlich der sicheren Einspeisung zur Jahreshöchstlast verglichen. Dafür wird zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast die direkt und indirekt eingespeiste Leistung herangezogen und in ein Verhältnis zu der installierten Leistung gesetzt. Ist die benötigte Leistung für die Lastreduktion zur Jahreshöchstlast größer als die installierte Leistung (hauptsächlich bei Laufwasserkraft der Fall), können Werte über 100% als Ergebnis resultieren. Für die Analysen der zur Lastreduktion benötigten Energie, sowie des Anteils der erneuerbaren

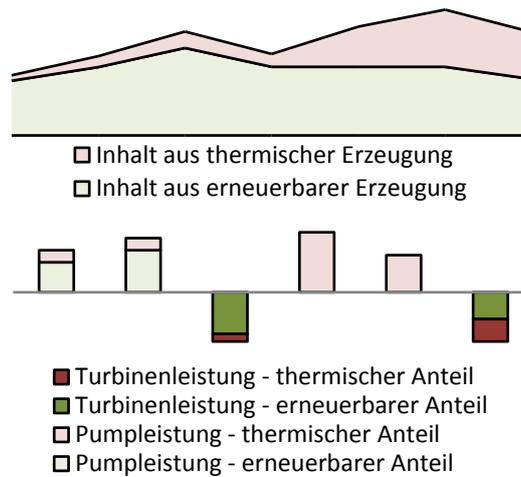


Abbildung 3: Schematische Darstellung über den Verlauf des Anteils erneuerbarer Energie im Speicherbecken (oben) sowie Pump- und Turbinenbetrieb (unten)

Einspeisung zur Jahreshöchstlast gemessen an der installierten Leistung wird immer der minimale Wert des Ergebnisses aus den einzelnen Einspeisezeitreihen für den Vergleich herangezogen. Somit werden stets die schlechtesten möglichen Fälle berücksichtigt. Aus den Ergebnissen der Analysen lassen sich Vergleiche zwischen den einzelnen erneuerbaren Erzeugern anstellen. Insbesondere hinsichtlich der Wertsteigerung für die Deckung der Spitzenlast aus einer Kombination von PSKW und regenerativer Einspeisung.

3 Ergebnisse

Die Untersuchung hinsichtlich der erreichbaren Restlastgrenzen ermöglicht es, erneuerbare Einspeisung in Kombination mit PSKW zu vergleichen (siehe Tabelle 3). Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass im Fall der geringen Durchdringungsrate erneuerbarer Erzeugung die Einsatzstrategie 1 zu besseren Restlastgrenzen führt als die ES2. Ein Ergebnis, dass sich mit der Beschränkung des Pumpbetriebs auf jene Zeitpunkte an denen die Residuallast eine untere Schranke unterschreitet erklären lässt. Dadurch wird öfters in direkt hintereinanderfolgenden Zeitpunkten Energie aufgenommen und diese verweilt länger im Speicherbecken bevor sie wieder abgegeben werden kann. Bei beiden Einsatzstrategien ist zu beobachten, dass eine Kombination aus PSKW und Laufwasserkraft die geringsten Restlastgrenzen erreichbar macht. Dieses Ergebnis in Verbindung mit den Angaben bezüglich der installierten Leistungen aus Tabelle 1 ergibt eine klare Bevorteilung der Laufwasserkraft gegenüber der Windkraft und Photovoltaik, wobei sich die Windkraft gegenüber der Photovoltaik aus denselben Gründen durchsetzt. Aufgrund des hohen Ausbaugrades der Laufwasserkraft in Deutschland und den geringen noch vorhandenen Potentialen, wird für den Fall der hohen Durchdringungsrate erneuerbarer Einspeisung die Laufwasserkraft außer Acht gelassen. Bei einem hohen Anteil erneuerbarer Erzeugung kommt es bei Windkraft und Photovoltaik zu zwei gegenläufigen Effekten. Bei der Windkrafteinspeisung führt die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Erzeugung zu einer Verringerung der Restlastgrenze bei gleicher Speicherkapazität. Bei der Photovoltaik ist der umgekehrte Fall zutreffend. Bei exklusiver Windkrafterzeugung lässt sich die Reduktion der Restlastgrenze über die allgemein niedrigere Residuallast erklären, dadurch hat das PSKW mehr Möglichkeiten über zeitliche Energieverlagerungen die Restlast weiter nach unten zu drücken. In einer Situation mit ausschließlich PV-Erzeugung tritt der Fall ein, dass das PSKW nicht mehr primär zur Reduktion der Restlast sondern zum Ausgleich negativer Residuallasten verwendet wird. Damit lässt sich ebenso begründen, wieso es keinen Unterschied macht ob bei einem PV-dominierten System die ES1 oder die ES2 umgesetzt wird.

Bei den Leerstellen in Tabelle 3 ist die Speicherkapazität nicht ausreichend um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu ermöglichen. Bei exklusiver Windkrafteinspeisung ist die Einsatzstrategie 1 der Strategie 2 aufgrund einer niedrigeren Restlastgrenze vorzuziehen. Allgemein lässt sich aus den Ergebnissen in Tabelle 3 die Erkenntnis ableiten, dass die Einsatzstrategie 1 der Strategie 2 aus Sicht der einzuhaltenden Restlastgrenze auf jeden Fall zu bevorzugen ist. Bei einem Wechsel von Strategie 1 auf 2 wechseln in einem System mit geringem Anteil erneuerbarer Einspeisung Laufwasserkraft und Windkraft ihre Stellung. Die Bevorzugung von Windkraft lässt sich in diesem Fall über die installierte Kapazität erklären. Die höhere installierte Leistung, bei gleicher Jahreserzeugung, von Windkraft führt dazu, dass die untere Restlastgrenze an, aus Sicht der erneuerbaren Einspeisung, zeitlich besseren Punkten unterschritten wird, was sich positiv auf den Speicherbedarf auswirkt. In jedem Fall aber schneidet die PV am schlechtesten ab, wobei der Unterschied bei einem 5%igen Anteil gering ausfällt, hingegen bei einem hohen Anteil erneuerbarer Einspeisung deutlicher wird.

Tabelle 3: Ergebnisse der Restlastgrenzenermittlung

Einsatzstrategie 1						
Kapazität [GWh]	5% erneuerbarer Anteil			35% erneuerbarer Anteil		
	Wind	Laufwasser	PV	Wind	Laufwasser	PV
40	92%	91%	93%			
241	85%	83%	85%			
533	82%	80%	82%	80%		
1.079	79%	78%	80%	71%		87%
Einsatzstrategie 2						
Kapazität [GWh]	5% erneuerbarer Anteil			35% erneuerbarer Anteil		
	Wind	Laufwasser	PV	Wind	Laufwasser	PV
40	94%	92%	95%			
241	90%	89%	91%			
533	88%	87%	90%	81%		
1.079	86%	86%	88%	78%		87%

Bei den Ergebnissen zur Ermittlung des Beitrags erneuerbarer Einspeisung auf den Energiebedarf zur Lastreduktion muss stets vor Augen geführt werden, dass die unterschiedlichen Kombinationen aus Speichergöße und erneuerbarer Einspeisung andere Restlastgrenzen aufweisen. Daher ist auch der direkte und indirekte Beitrag der Erneuerbaren von Fall zu Fall unterschiedlich und muss immer in Bezug auf die benötigte Energie zur Restlastreduktion gesehen werden. Tabelle 4 zeigt den aus der Lastreduktion zur Einhaltung der Restlastgrenze resultierenden Energiebedarf und den direkten Anteil sowie die Summe aus direktem und indirektem Beitrag erneuerbarer Erzeugung zur Deckung dieses Bedarfs. Der fehlende Anteil wird durch gespeicherte thermische Erzeugung bereitgestellt. Unabhängig von der gewählten erneuerbaren Einspeisequelle zeigt sich, dass durch die Verwendung eines PSKW der Beitrag der Erneuerbaren zur Lastreduktion weiter erhöht werden kann. Daraus lässt sich eine positive Wirkung durch die Kombination aus regenerativer Erzeugung und Speichern ableiten, zumal die Restlastreduktion in diesem Ausmaß erst durch den Speicher ermöglicht wird. Eine nach Erzeugungstyp differenzierte Betrachtung zeigt, dass mit sinkender Restlastgrenze (entspricht einem steigenden Energiebedarf zur Lastreduktion) der direkte Anteil erneuerbarer Einspeisung für Wind- und Laufwasserkraft anteilmäßig zurück geht. Für Photovoltaik ist genau das Gegenteil der Fall. Eine Gegebenheit die sich damit begründen lässt, dass die Einspeisung aus PV um die Mittagsstunden konzentriert ist. Durch die Absenkung der Restlastgrenze muss die Residuallast auch zu Mittagsstunden reduziert werden, wodurch der direkte Anteil an der zur Reduktion verfügbaren PV-Erzeugung ansteigt. Zu erkennen ist, dass bei 5%-erneuerbarem Anteil durch PV unter Verwendung der ES1 mäßig gute Gesamtanteile regenerativer Erzeugung zur Lastreduktion erreicht werden. Bei niedrigeren Restlastgrenzen sinkt der Wert unter 70%. Bei allen anderen Fällen wird durch die Kombination aus erneuerbarer Produktion

Tabelle 4: Ergebnisse der Analyse zum Beitrag erneuerbarer Einspeisung für die benötigte Energie aus der Lastreduktion zur Einhaltung der Restlastgrenze

		Einsatzstrategie 1			Einsatzstrategie 2			
Speichergröße		Energie für Lastreduktion	Direkter Anteil	Dir. + indir. Anteil	Energie für Lastreduktion	Direkter Anteil	Dir. + indir. Anteil	
5%	Wind	40 GWh	173 GWh	53%	100%	84 GWh	57%	100%
		241 GWh	2.758 GWh	45%	87%	473 GWh	50%	96%
		533 GWh	5.906 GWh	43%	91%	1.157 GWh	47%	90%
		1079 GWh	11.863 GWh	40%	88%	2.216 GWh	45%	86%
35%	Wind	40 GWh						
		241 GWh						
		533 GWh	8.972 GWh	91%	100%	6.955 GWh	91%	100%
		1079 GWh	34.005 GWh	84%	100%	13.494 GWh	90%	100%
5%	Laufwasser	40 GWh	333 GWh	76%	100%	173 GWh	79%	100%
		241 GWh	4.667 GWh	53%	86%	727 GWh	71%	98%
		533 GWh	8.972 GWh	47%	90%	1.498 GWh	64%	95%
		1079 GWh	13.494 GWh	42%	87%	2.055 GWh	59%	91%
5%	PV	40 GWh	98 GWh	7%	96%	26 GWh	1%	100%
		241 GWh	2.758 GWh	29%	69%	293 GWh	16%	100%
		533 GWh	5.906 GWh	32%	62%	473 GWh	22%	100%
		1079 GWh	9.421 GWh	33%	60%	1.058 GWh	26%	97%
35%	PV	40 GWh						
		241 GWh						
		533 GWh						
		1079 GWh	1.626 GWh	34%	100%	1.626 GWh	34%	100%

und PSKW-Einsatz der Anteil der benötigten Energie zur Lastreduktion immer über 85% in vielen Fällen sogar über 95% gehalten. Die Verwendung der ES2 führt zu einem generell höheren Anteil an erneuerbarer Erzeugung, wobei jedoch die Restlastgrenze in diesen Fällen höher liegt. Der Übergang von einem System mit niedrigem Anteil zu einem mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeugung führt bei Betrachtung der Windenergie unter Verwendung der ES1 zu einer Steigerung des Anteils an erneuerbarer Energie zur Lastreduktion um den Faktor 3. Bei Verwendung der ES2 sogar um den Faktor 7. Bei PV ist durch den Übergang unter Verwendung der ES1 ein Rückgang zu vermerken, bei ES2 ein leichter Zuwachs.

Die Ergebnisse der Analyse der direkten und indirekten erneuerbaren Einspeisung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Tabelle zeigt die jeweilig installierte Leistung und die für die Einhaltung der Restlastgrenze notwendige Lastreduktion bezogen auf die installierte Leistung der erneuerbaren Erzeugung. Da die Pumpspeicherstrategien darauf ausgelegt sind die Residuallast unter die Restlastgrenze zu bringen, ist dieser Wert der maximal mögliche Wert der durch direkte und indirekte Einspeisung von Seiten des Modells her erreicht werden kann. Unabhängig davon welche, Einsatzstrategie mit welcher erneuerbaren Erzeugung kombiniert wird, zeichnen sich positive Effekte ab. Der Anteil regenerativer Erzeugung zur Spitzenlastdeckung steigt an. Aufgrund der geringen installierten Leistung auf Basis der verhältnismäßig hohen Volllaststundenzahl von Laufwasserkraft übersteigt der Bedarf der Leistung zur Lastreduktion die installierte Leistung. Es ist eine, im Vergleich zu den Windkraft und PV, hohe direkte Einspeisung bemerkbar, die durch den Einsatz von PSKW sehr stark weiter erhöht wird. Im Fall einer hohen Durchdringungsrate erneuerbarer Einspeisung kommt es zu der Situation, dass mehr erneuerbare Leistung aus dem Speicher bereitgestellt werden könnte, diese aber aufgrund der Restriktionen des Modells

Tabelle 5: Ergebnisse der Analyse zum Beitrag erneuerbarer Einspeisung die eingespeiste Leistung zum Zeitpunkt der Spitzenlast bezogen auf die installierte Leistung

		Einsatzstrategie 1				Einsatzstrategie 2			
	Speichergröße	Installierte Leistung	Lastreduktion bez. auf P _{INST}	Direkter Anteil	Direkter +indirekter Anteil	Lastreduktion bez. auf P _{INST}	Direkter Anteil	Direkter +indirekter Anteil	
05%	Wind	40 GWh	16,5 GW	42%	4%	42%	36%	4%	36%
		241 GWh	16,5 GW	80%	4%	69%	53%	4%	53%
		533 GWh	16,5 GW	96%	4%	79%	65%	4%	60%
		1079 GWh	16,5 GW	114%	4%	97%	76%	4%	63%
35%	Wind	40 GWh	72,8 GW						
		241 GWh	72,8 GW						
		533 GWh	72,8 GW	24%	6%	24%	23%	6%	23%
		1079 GWh	72,8 GW	35%	6%	35%	27%	6%	27%
05%	Laufwasser	40 GWh	6,4 GW	127%	31%	127%	110%	31%	110%
		241 GWh	6,4 GW	233%	31%	179%	151%	31%	143%
		533 GWh	6,4 GW	275%	31%	228%	179%	31%	156%
		1079 GWh	6,4 GW	306%	31%	231%	192%	31%	163%
05%	PV	40 GWh	36,9 GW	17%	0%	16%	12%	0%	12%
		241 GWh	36,9 GW	36%	0%	18%	21%	0%	21%
		533 GWh	36,9 GW	43%	0%	22%	24%	0%	23%
		1079 GWh	36,9 GW	48%	0%	23%	28%	0%	24%
35%	PV	40 GWh	207,7 GW						
		241 GWh	207,7 GW						
		533 GWh	207,7 GW						
		1079 GWh	207,7 GW	6%	0%	6%	6%	0%	6%

nicht abgerufen wird. In diesen Fällen wird der Bedarf zur Lastreduktion zu 100% aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt. Bezüglich der Wahl der zu verwendenden Einsatzstrategie zeigen die Ergebnisse, dass sich unter Verwendung der ES2 höhere regenerative Anteile zur Lastreduktion erreichen lassen, wobei man sich vor Augen führen muss, dass die ES2 eine höhere und somit für das System schlechtere Restlastgrenze zur Folge hat. Bezogen auf die installierte Leistung lassen sich die besten Ergebnisse aus einer Kombination von PSKW und Laufwasserkraft, gefolgt von Windkraft und zuletzt von PV erzielen. Im Fall eines niedrigen erneuerbaren Anteils ist unter Verwendung der Einsatzstrategie 1 bei Windkraft durch den koordinierten Einsatz des PSKW ein bis zu 25facher Anstieg der Einspeisung bezogen auf die installierte Leistung zu verbuchen. Bei Laufwasserkraft fällt dieser mit einem 8fachen Anstieg geringer aus. Bei der Verwendung der ES2 fällt dieser Anstieg bei Laufwasser- und Windkraft geringer aus. Einzig bei PV kommt es unter Verwendung der ES2 zu höheren Werten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung des neuen Speichereinsatzziels, nämlich die Einhaltung einer gewissen Restlastgrenze über das ganze Jahr, ist eine neue Herangehensweise zur Verwendung von Pumpspeicherkraftwerken. Mit den im Umfeld von Deutschland vorhandenen Potentialen lassen sich durch eine Kombination aus PSKW und regenerativer Einspeisung teilweise stark reduzierte maximale Restlasten für Deutschland erreichen. Bevorzugt ist die Einsatzstrategie 1 zu verwenden, da sie bei gleicher Speicherkapazität niedrigere Restlastgrenzen ermöglicht, wenngleich durch Verwendung der ES2 der regenerative Anteil der Energie im Speicher höher ist als bei der ES1. Bei einer erneuerbaren Speisung des System mit ausschließlich PV ist die Anwendung der ES2 aufgrund der gezeigten Ergebnisse vorzuziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination aus Laufwasserkraft und einem koordinierten Einsatz von PSKWs einer Kombination mit den anderen erneuerbaren Quellen vorzuziehen ist, da sowohl in puncto erreichbare Restlastgrenze als auch bei der Nutzung der installierten Leistung zur Reduktion der Last im Zeitpunkt der Jahresspitze die besten Ergebnisse erzielt werden. Eine Kombination aus PV und PSKW zeigt mäßig gute Ergebnisse, da der Speicheraufwand zu hoch und bei gegebener installierter Leistung der Beitrag der erneuerbaren Einspeisung zur Spitzenlastdeckung zwar erhöht wurde, aber in keinem Maß zur installierten Leistung steht. Die Kombination aus Windkraft und Pumpspeichern zeigt positive Ergebnisse, da durch den Einsatz des PSKW die an sich schon vorteilhafte Charakteristik der Windkraftherzeugung verstärkt wird. Wodurch ein verhältnismäßig hoher Anteil der installierten Kapazität auch tatsächlich zur Reduktion der Jahresspitze auf das Restlastgrenzen-Niveau verwendet werden kann.

In dieser Arbeit werden die Kosten für den Bau der neuen Speichereinrichtungen sowie die durch die Lastreduktion resultierende Kostenreduktion nicht berücksichtigt. Dieser Punkt wird in weiterer Folge noch untersucht werden, da er die Frage beantwortet, ob sich eine solche Betriebsweise der PSKW rentiert oder nicht.

Die Annahme der ausschließlichen Erzeugung aus einer erneuerbaren Quelle dient zur Veranschaulichung der Effekte, die aus einer exklusiven Einspeisung in Kombination mit PSKW resultieren. Diese Gegebenheit entspricht nicht den Gegebenheiten in der Realität. Weitere Untersuchungen müssen daher für verschiedene Variationen erneuerbarer Erzeugungen durchgeführt und hinsichtlich der Effekte und Kosten analysiert werden.

Literatur

- DWD (2012a). Cmsaf - climate monitoring. http://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewHome;jsessionid=A7EAD6410BA418ED1179EF351AEE4794.ku_2. Accessed: 2012-07-03.
- DWD (2012b). Webwerdis - Weather Request and Distribution system. https://werdis.dwd.de/werdis/start_js_JSP.do. Accessed: 2012-07-03.
- Gimeno-Gutiérrez, M. und Lacal-Arántegui, R. (2013). *Assesment of the European potential for pumped hydropower energy storage*. European Commission, Niederlande.
- LFU (2013). Bayerische Landesamt für Umwelt.
- Nacht, T. und Stigler, H. (2013). Anforderungen an Pumpspeicherkraftwerke in der neuen Elektrizitätswirtschaft. In *IEWT 2013, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*.
- NEP (2012). *Netzentwicklungsplan Strom 2012*. Übertragungsnetzbetreiber Deutschland, Deutschland.
- Pattis, F. (2012). Modellierung der Stromerzeugung aus Photovoltaik in Deutschland. Master's thesis, TU Graz, Graz.
- Ruhrverband (2013). Abteilung Mengenwirtschaft und Morphologie.
- Schüppel, A. (2010). Modellierungsansätze zur Beschreibung dargebotsabhaengiger Stromerzeugung. Master's thesis, TU Graz, Graz.
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (2013).