

Speicherbewirtschaftung bei Vollversorgung Österreichs mit regenerativem Strom

Christoph Maier¹

Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe,
Gußhausstraße 25/370-1, 1040 Wien, Austria
Tel.: +43 | (0)1 | 58801 | 370142, Fax: +43 | (0)1 | 58801 | 9370142
Email: maier@ea.tuwien.ac.at
Web: <http://www.ea.tuwien.ac.at>

Kurzfassung:

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung wird in den nächsten Jahrzehnten kontinuierlich zunehmen. Deren fluktuierendes Dargebot deckt sich oftmals nicht mit dem Verbrauch. Diese stetige Diskrepanz muss mit Energiespeichern ausgeglichen werden. Zur großtechnischen Speicherung von elektrischer Energie eignen sich aus heutiger Sicht am besten Pumpspeicherkraftwerke. Österreich verfügt im Vergleich zu anderen Ländern über eine Vielzahl dieses Speichertyps.

Aufbauend auf der Problematik der Vollversorgung Österreichs mit regenerativem Strom werden die bestehenden österreichischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke, sowie ein notwendiger ergänzender Wasserstoffspeicher in einem Modell abgebildet und deren Speicherbewirtschaftung analysiert. Zusätzlich zur Speicherbewirtschaftung wird ein mögliches Verbrauchssteigerungspotenzial für Österreich berechnet.

Die durchschnittliche regenerative Erzeugung liegt in den betrachteten vierjährigen Zeitraum bei knapp 89TWh jährlich. Demgegenüber steht ein Endverbrauch von 68,6TWh jährlich. Zusätzlich müssen Speicherverluste in der Höhe von 14,3TWh gedeckt werden. Das ungenutzte Erzeugungspotenzial von 6,0TWh ermöglicht ein Laststeigerungspotenzial von 3,5TWh, welches durch die Verluste der Wasserstoffspeicherung begrenzt ist. Die Erhöhung des Verbrauchs von 5,0% ist daher mit einem überproportionalen Wachstum der Gesamtspeicherverluste von 17,6% verbunden.

Keywords: Speicherbewirtschaftung von (Pump-)Speichern, Modellierung von Österreichs (Pump-)Speicherkraftwerken, Wasserstoffspeicher, regenerative Stromerzeugung

1 Einleitung

Für eine nachhaltige und ökologische Stromversorgung Österreichs aus vollständig erneuerbaren Quellen bedarf es Energiespeicher, um deren fluktuierende Erzeugung mit dem Verbrauch in Einklang zu bringen. Österreich verfügt über eine Vielzahl von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken, die heute als Spitzenkraftwerke eingesetzt werden. Bei einer Vollversorgung mit regenerativem Strom kommen jedoch andere Anforderungen auf sie zu.

¹ Jungautor

Das Paper basiert auf der Diplomarbeit des Autors [1] und beginnt mit der Beschreibung des zu Grunde liegenden Datenmaterials. Dieses basiert auf der Erhebung der österreichischen (Pump-)Speicherkraftwerke und den regenerativen Erzeugungspotenzialen des Projekts „Super-4-Micro-Grid – Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel“ [2] und den österreichischen Lastprofilen von 2007 und 2008.

Für die Berechnung der Speicherbewirtschaftung werden die österreichischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke in einem Näherungsmodell abgebildet, runtergebrochen auf einzelne Speicherbecken mit Krafthaus unter Berücksichtigung des natürlichen Zuflusses.

Nach der Verifizierung des Modells anhand ausgewählter Betriebsszenarien, wird der Speichereinsatz der (Pump-)Speicher und eines zusätzlichen fiktiven Wasserstoffspeichers durchgeführt.

Als Abschluss wird die maximale Laststeigerung bezogen auf den österreichischen Stromverbrauch von 2008 bestimmt, ab der die Speicherverluste dem regenerativ erzeugten Stromüberschuss gleichkommen.

2 Datengrundlage

2.1 Hydraulische Speicher

Als Grundlage für die Datenerhebung der (Pump-)Speicherkraftwerke dient die Kraftwerkserhebung des Projekts „Super-4-Micro-Grid – Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel“ [2]. Die Erhebung umfasst 81 (Pump-)Speicherkraftwerke und inkludiert auch einige (gesicherte) zukünftige Erweiterungsprojekte. Eine detaillierte Auflistung der Kraftwerke ist in [1] zu finden. Tabelle 1 gibt die Summe der wichtigsten Parameter der Kraftwerke wieder.

Tabelle 1: Die wichtigsten Parameter österreichischer (Pump-)Speicherkraftwerke in Summendarstellung [1]

| | EPL | RAV | Pumpleistung | Energieinhalt (pot.) |
|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | (MW) | (GWh) | (MW) | (GWh) |
| Summe | 8543 | 10400 | 4182 | 3882 |

2.2 Zeitreihen der elektrischen Erzeugung

Als Datenbasis für die regenerative elektrische Erzeugung dienen die Potenzialerhebungen und Zeitreihen des Projekts „Super-4-Micro-Grid – Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel“ [2]. Diese Zeitreihen basieren auf meteorologischen Messdaten der Windgeschwindigkeit, der Globalstrahlung und des Niederschlags über einen Zeitraum von 15 Jahren (1994 bis 2008) und stehen in stündlicher Auflösung zur Verfügung. Die meteorologischen Messstationsdaten wurden durch Anwendung von Konversionsmodellen und unter Zuhilfenahme eines Geo-Information-Systems (GIS) für die Ermittlung der Flächenpotenziale in elektrische Einspeisezeitreihen transformiert. Tabelle 2 gibt eine Zusammenfassung der Potenziale.

Von dieser durchschnittlichen jährlichen potenziellen Gesamterzeugung ist der Anteil der (Pump-)Speicherkraftwerke zu subtrahieren. Die Potenziale der Erzeugung mit Hilfe von Speicherkraftwerken beruht auf der Abarbeitung deren natürlichen Zuflusses, dessen Wert sich im Regelarbeitsvermögen widerspiegelt. Dieses Potenzial findet direkt über die Modellierung der (Pump-)Speicher Einzug.

Tabelle 2: Potenziale der jährlichen regenerativen Erzeugung für Österreich nach [2]

| | |
|------------------------|--------|
| Gesamterzeugung | 91 TWh |
| Windkraft | 8 TWh |
| Photovoltaik | 31 TWh |
| Wasserkraft | 52 TWh |
| ○ Laufwasserkraftwerke | 42 TWh |
| ○ Speicherkraftwerke | 10 TWh |

2.3 Zeitreihen des elektrischen Verbrauchs

Die Zeitreihen des elektrischen Verbrauchs basieren auf Daten der E-Control und ist eine Kombination aus den Jahren 2007 und 2008. Dabei bestehen jeweils drei Jahre aus dem Belastungsprofil 2007 und ein Jahr aus dem Profil 2008. Dies ermöglicht eine gewisse Vielfalt im Verbraucherprofil.

Die Daten stehen in viertelstündlicher Auflösung zur Verfügung. Um sie auf die gleiche stündliche Auflösung wie die Erzeugungsreihen zu transformieren, wird der Mittelwert über eine Stunde gebildet.

Da die Belastungsverläufe nur für die öffentliche Stromversorgung zur Verfügung stehen werden jeweils 4 aufeinanderfolgende Jahre auf den gesamten Inlandsstromverbrauch 2008 hochgerechnet. Damit ist über 4 Jahre gesehen der durchschnittliche Jahresverbrauch gleich dem Gesamtverbrauch von 2008.

2.4 Residuallast

Subtrahiert man die Lastanforderungen von der regenerativen Erzeugung aus Wind-, Wasserkraft und Photovoltaik erhält man ein Residuallastprofil. Dabei werden jeweils drei Jahre mit dem Profil 2007 und ein Jahr mit dem Profil von 2008 subtrahiert. Das regenerative Erzeugungsprofil steht insgesamt für einen Zeitraum von 15 Jahre zur Verfügung.

Der Erzeugungsüberschuss der Residuallast beträgt knapp 24GW, das größte Defizit bei 8,8GW. Durchschnittlich 4000h in Jahr gibt es einen Erzeugungsüberschuss. Dieser beträgt durchschnittliche 24,6TWh pro Jahr. Das jährliche Erzeugungsdefizit macht im Mittel 13,1TWh aus.

Der energetische Nettoüberschuss beträgt demnach im Mittel 11,5TWh. Zusammen mit dem Regelarbeitsvermögen der Speicherkraftwerke formt er jene Energie, die zur Deckung der Speicherverluste durch die Energieverlagerung verwendet werden kann.

3 Modellierung

3.1 (Pump-)Speicher

Ziel der Modellierung ist die Abbildung eines realen (Pump-) Speicherkraftwerks in ein einfaches und effizientes Modell. Dieses Modell dient als Ausgangsbasis für die Speicherbewirtschaftung.

Es werden folgende Systemgrößen eines Kraftwerks modelliert, die aus [2] gewonnen werden können:

- Nutzbare SpeichergroÙe
- (mittlere) Rohfallhöhe bzw. Ausbaufallhöhe
- Engpassleistung
- Pumpleistung
- Regelarbeitsvermögen (RAV)
- Wirkungsgrade der Maschinen

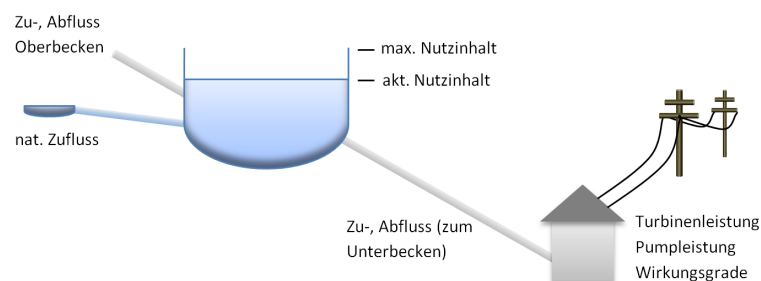


Abbildung 1: (Pump-)Speichermodell [1]

Der Speichersee besitzt einen Abfluss zum Kraftwerkshaus und hat einen maximalen und einen aktuellen Nutzinhalt. Um die potenzielle Energie des Speicherinhaltes zu berechnen wird zusätzlich die (mittlere) Rohfallhöhe benötigt. Optional besitzt der Speichersee auch einen Zufluss einer oder mehrerer höher gelegener Kraftwerksstufen. Zumeist hat ein See auch einen Wasserzufluss aus natürlichen Quellen. Dieser kann über das Regelarbeitsvermögen abgeschätzt werden.

Das Kraftwerkshaus beinhaltet die Turbine und den Generator zur Stromerzeugung. Die Energieumwandlung ist verlustbehaftet und wird über den Turbinen- und Generatorwirkungsgrad angegeben. Dieser wird in dieser Arbeit kombiniert mit 89,4% angenommen. Optional verfügt das Kraftwerk auch eine Speicherpumpe, dessen Pumpvorgang ebenfalls verlustbehaftet ist und dessen Wirkungsgrad ebenfalls mit 89,4 % angenommen wird. Damit ergibt sich ein Umwälzwirkungsgrad von exakt 80 %.

Die Speicherstände der einzelnen Kraftwerke ändern sich auf stündlicher Basis, sei es durch den natürlichen Zulauf oder durch Zu- und Abfluss von Wasser in ein Untergewässer. Jede Stunde wird der natürliche Zufluss zum momentanen Speicherstand addiert. Dieser stündliche natürliche Zufluss wird über das Regelarbeitsvermögen abgeschätzt. Der natürliche Zufluss eines Speichersees ist über das Jahr gesehen nicht konstant. Einflussfaktoren sind z.B. die Jahreszeit, die geografische Lage und die Anzahl der beigeleiteten Gewässer und deren Einzugsgebiet, um nur einige zu nennen. Mit dem Begriff des Regelarbeitsvermögens wird bei Kraftwerksbetreibern die durchschnittliche Jahreserzeugung aus natürlichem Zufluss angegeben. Genauere Daten über den zeitlichen

Verlauf des natürlichen Zuflusses sind nur sehr schwer zu erfahren und müssten für jeden Speichersee extra berücksichtigt werden. Um den Verlauf des natürlichen Zuflusses abzuschätzen zu können, wird ein sinusförmiger Zusammenhang über die Zeit angenommen. Das Minimum des natürlichen Zuflusses bei großen Jahresspeichern liegt typischerweise in den Wintermonaten und beträgt (jährlich schwankend) um die 20% des Gesamtflusses [6]. Der Hauptteil des Zuflusses fällt in den Monaten der Schneeschmelze zwischen Mai und September an. Nach [6] liegt das Minimum bei Jahresspeicherkraftwerken zirka im Februar und wird im Juli maximal.

Der Zu- und Abfluss ins bzw. von einem Unterbecken ist abhängig von dem momentanen Zustand des Netzes. Ist in der aktuellen Stunde ein Leistungsdefizit vorhanden, so ist Leistung durch Turbinieren von Wasser zu generieren, wodurch der Speicherstand sinkt. Ist Pumpbetrieb bei einem Kraftwerk möglich, so wird bei Leistungsüberschuss im Netz Wasser aus einem Untergewässer in den Speicher gepumpt. Jedes Kraftwerk kann nur eine gewisse maximale Leistung auf- oder abgeben. Die Schranken dafür ist die maximale Engpassleistung bzw. die maximale Pumpleistung eines Kraftwerks.

Für die spätere Speicherbewirtschaftung wird perfekte Regelbarkeit der Kraftwerke sowohl in Turbinen- als auch im Pumpbetrieb angenommen. Der Grundablass eines Speichersees wird ebenfalls vernachlässigt. Der Nutzinhalt der Speicherkraftwerke wird als tatsächlich zur Verfügung stehende Energiemenge angesehen. Darüber hinaus wird die mittlere Rohfallhöhe als Höhendifferenz der Energieschwerpunkte betrachtet und somit als Konstante zur Berechnung des aktuellen Energieinhaltes betrachtet.

3.2 Kraftwerksgruppe

Bei einer Kraftwerksgruppe mit mehreren Stufen (z.B. Kaprun) ist auch die Beziehung der einzelnen Speicherseen von Bedeutung. Eine Gruppe setzt sich somit aus mehreren Einzelkraftwerke zusammen, die miteinander verkettet sind.

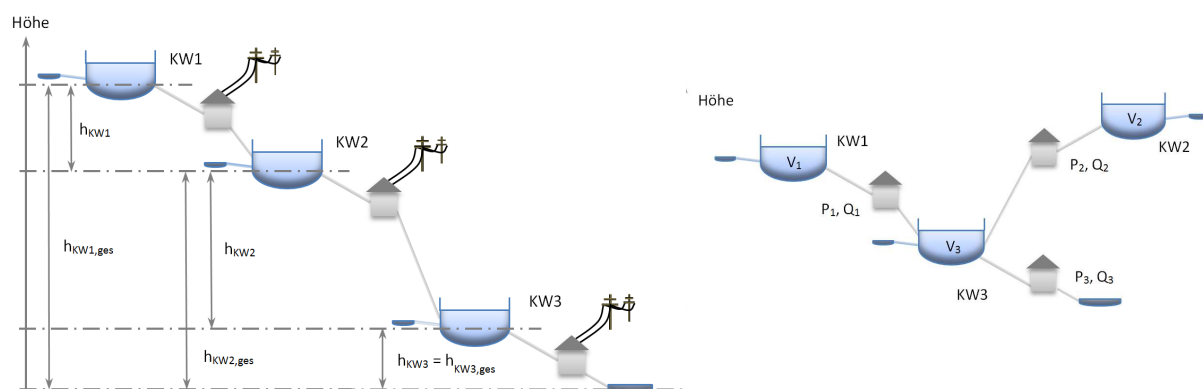


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Kraftwerksgruppen nach [1]

Neben linearen Kraftwerksketten gibt es auch komplexere Verkettungen von einzelnen Kraftwerken (siehe Abbildung 2). Beispiele dafür in Österreich sind zum Beispiel die Kraftwerksgruppe Kops-Vermunt-Lünersee der Illwerke VKW in Vorarlberg oder die Gruppe Fragant der Kelag in Kärnten. Dieser Umstand wird im Modell berücksichtigt. Eine Speicherstufe kann somit mehrere parallele Oberstufen besitzen.

Tritt der Fall ein, dass ein Speichersee mehrere Unterstufen besitzt, erfolgt eine Vereinfachung. Dabei wird der Speicher der gemeinsamen Oberstufe zweier oder mehrerer Unterstufen proportional zu deren Ausbaudurchfluss Q geteilt. Dadurch kann gewährleistet werden, dass jeder Speichersee nur ein Untergewässer hat.

3.3 Wasserstoffspeicher-Brennstoffzelle

Die Energieinhalte aller (Pump-)Speicherkraftwerke reichen nicht aus, um bei einer rein regenerativen Erzeugung die Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch für Österreich zu jedem Zeitpunkt zu decken [2,1]. Es wird ein ergänzender Speicher mit zusätzlicher Speicherkapazität benötigt.

In dieser Arbeit wird als zusätzlicher Speicher eine Kombination aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle betrachtet. Das Modell lässt aber auch zu, dass andere Speichertechnologien, wie z.B. Power-to-Gas, eingesetzt werden können. Entscheidend für die energetische Betrachtung ist der Wirkungsgrad der Stromspeicherung und –erzeugung.

Bei der gewählten Speicherart wird mittels Elektrolyseur Wasserstoff generiert und anschließend gespeichert. Der gespeicherte Wasserstoff kann anschließend mittels Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt werden.

Der Wirkungsgrad der Elektrolyse von Wasser liegt laut [4] bei über 70% und kann für Großanwendungen bereits 80% übertreffen. Für die Modellierung wird ein Wirkungsgrad von 80% für die Elektrolyse gewählt.

Zum Speichern großer Wasserstoffvolumina ist die unterirdische Speicherung in Salzkavernen viel diskutiert. Der Komprimierungsaufwand auf Drücke bis zu 200 bar beträgt, rund 7% [5]. Die Leckverluste werden aufgrund ihrer verschwindend kleinen Zahl vernachlässigt [3].

Der kombinierte Wirkungsgrad der Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff beträgt

$$\eta_{\text{Speicherung}} = \eta_{\text{Elektrolyse}} \cdot (100\% - \nu_{\text{Komprimierung}}) = 80\% \cdot (100\% - 7\%) = 74,4\%$$

Die Rückumwandlung von Wasserstoff in elektrischen Strom erfolgt im Modell über Brennstoffzellen. Je nach Technologie ergeben sich Umwandlungswirkungsgrad von 40-60%. Für die Modellierung wird ein Wirkungsgrad von 50% angenommen. Dieser entspricht in etwa den mittelfristig realisierbaren Wirkungsgraden der Brennstoffzellentypen MCFC und SOFC, die sich für stationäre Anwendungen eignen.

Der Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad beträgt bei diesem Wasserstoffspeichermodell nun

$$\eta_{\text{Strom-zu-Strom}} = \eta_{\text{Speicherung}} \cdot \eta_{\text{Brennstoffzelle}} = 74,4\% \cdot 50\% = 37,2\%$$

4 Speicherbewirtschaftung

Die Speicherbewirtschaftung basiert auf einem Näherungsverfahren, das die große Anzahl von Speichern und Datenmenge des regenerativen Erzeugungsprofils miteinander verknüpfen soll. Ziel ist eine Abarbeitung der Speicher in einem Schritt, damit der stündliche Speicherzustand für jeden Speicher nur einmal berechnet werden muss.

4.1 Einzelkraftwerk

Jedes Kraftwerk hat einen momentanen Speicherstand, der sich zwischen 0 und der maximalen Speicherkapazität bewegen kann. Jede Stunde wird der natürliche Zufluss zum momentanen Speicherstand addiert.

Kommt der betrachtete Speicher zum Einsatz, wird ihm die gesamte Leistungsdifferenz zwischen Erzeugung und Last zugewiesen. Das Kraftwerk kann nur ein maximales Defizit oder Überschuss bearbeiten. Die Schranken hierfür sind wie schon erwähnt seine Engpassleistung und die Pumpleistung.

Bei Erzeugungsüberschuss kann das Kraftwerk unter bestimmten Voraussetzungen Energie von einem Untergewässer in sein Speicherbecken pumpen. Zum einem muss ein Speichervolumen im Speicherbecken frei sein. Darüber hinaus darf auch das Untergewässer nicht leer sein, muss also Wasser für den Pumpvorgang zur Verfügung stellen können. Ist demnach entweder das Speicherbecken des betrachteten Kraftwerks voll oder sein Untergewässer leer, gibt es keinen Pumpvorgang und die Eingangsenergie wird unberührt an das nächste Kraftwerk übergeben. Ein Spezialfall tritt ein, wenn das Oberbecken bereits vollgefüllt ist, weiterhin Überschuss im Netz herrscht, jedoch kontinuierlich Wasser aus natürlicher Quelle zufließt. In diesem Fall würde der Speicherpegel den Maximalstand überschreiten. Daher wird in diesem Betriebsfall, auch wenn bereits Überschuss im Netz vorherrscht, Wasser in das Untergewässer abgelassen und zusätzlicher Strom generiert. Dieser kann gegebenenfalls an anderer Stelle gespeichert werden. Sollte das Unterbecken jedoch auch seinen maximalen Speicherstand erreicht haben, muss das Wasser ungenützt abgelassen werden und wird als verlorene Energie betrachtet.

Bei einem Leistungsdefizit im Netz wird das aktuell betrachtete Kraftwerk aufgefordert Strom zu erzeugen. Dafür muss im Speicher Wasser zur Verarbeitung zur Verfügung stehen und genügend Platz im Untergewässer frei sein.

Bei vollgefülltem Unterbecken und Oberbecken muss neues Wasser aus natürlichem Zufluss abgelassen werden. Dieses Wasser wird im Modell als ungenützte und damit verlorene Energie abgestuft.

4.2 Speichereinsatz

Von entscheidender Bedeutung ist, wann ein Speicher zum Einsatz kommt, um ein Erzeugungsdefizit oder einen Erzeugungsüberschuss auszugleichen.

Beim Speichereinsatz wird die Tatsache, dass einzelne Speicher zu einer Gruppe gehören berücksichtigt. Dadurch wird nicht jedes Kraftwerk für sich gereiht, sondern nur die Kraftwerksgruppen. Die Reihung der einzelnen Kraftwerksgruppen erfolgt durch Gewichtung. Jedes Einzelkraftwerk hat einen eigenen Gewichtungskoeffizienten. Dieser wird mit dem Verhältnis momentaner Speicherstand zu maximalen Speicherstand multipliziert. Anschließend wird für jede Gruppe von Speichern der arithmetische Mittelwert der Gewichtungen der einzelnen Speicher gebildet. Daraus ergibt sich die Gesamtgewichtung der Kraftwerksgruppe.

Die Speichergruppen werden abhängig von den Leistungsvorgaben des Netzes sortiert. Ist ein Leistungsdefizit im Netz vorhanden, so erfolgt die Reihung der Gruppe nach deren

Gewichtung in absteigender Form. Somit werden jene Speichergruppen zuerst eingesetzt, die einen hohen Speicherinhalt besitzen.

Ist jedoch ein Leistungsüberschuss vorhanden, werden die Speichergruppen aufsteigend sortiert. Jene Speichergruppen, die einen geringen Speicherstand haben, werden so zuerst aufgeladen.

Der Speichereinsatz der Einzelspeicher einer Gruppe verfolgt abhängig nach dem Zustand im Netz nach folgendem Schema.

4.2.1.1 Erzeugungsdefizit

Bei Erzeugungsdefizit wird zuerst das aktuelle Leistungsdefizit dem untersten Speicher zugewiesen. Dieses wird dann das Defizit durch Starten der Turbine versuchen auszugleichen. Sollte noch ein Defizit übrig bleiben, wird das Defizit an die nächsthöhere Stufe weitergeleitet. Dieser Vorgang wird für alle Speicher in der Gruppe fortgeführt. Durch dieses Schema kann gewährleistet werden, dass immer freie Volumina in einer Unterstufe für das Wasser der Oberstufe bereitstehen (siehe linke Darstellung in Abbildung 3).

Kann eine Kraftwerksgruppe das Defizit nicht vollständig decken, so wird das restliche Defizit an die nachfolgenden Kraftwerke bzw. Kraftwerksgruppen weitergeleitet.

4.2.1.2 Erzeugungsüberschuss

Ziel dieses Schemas ist möglichst viel Wasser in den obersten Stufen einer Kraftwerkgruppe zu speichern. Um eine Bewirtschaftung in einem Schritt zu gewährleisten wird daher zuerst die oberste Stufe in Betrieb genommen. Dadurch wird Platz im Becken des KW2 geschaffen, der durch Wasser des Beckens von KW3 gefüllt werden kann (siehe rechte Darstellung in Abbildung 3).

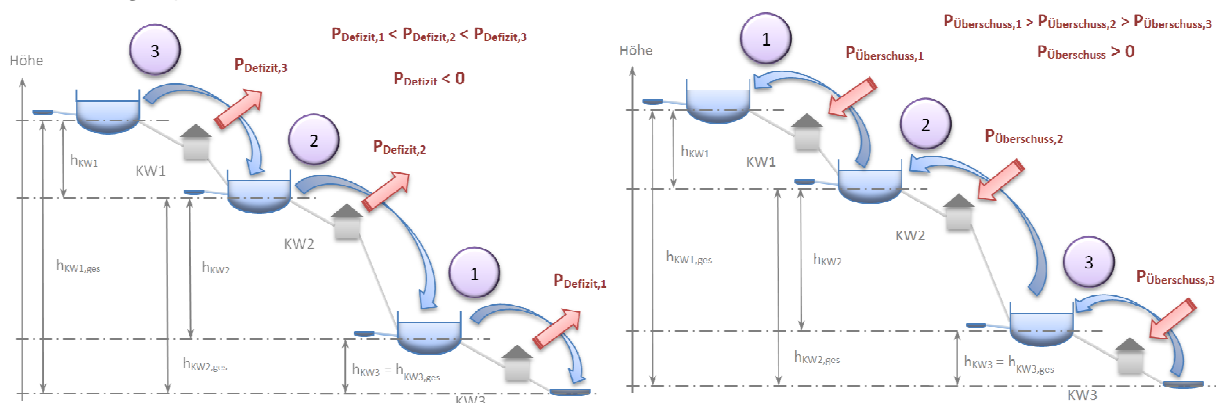


Abbildung 3: Speichereinsatz bei Erzeugungsdefizit (links) und bei Erzeugungsüberschuss (rechts) im Netz nach [1]

5 Implementierung

Für die Implementierung des Modells wurde MATLAB® gewählt. Da die einzelnen Kraftwerke bzw. Kraftwerksketten als reale Objekte in der Natur existierten, bietet sich eine Modellierung dieser als Softwareobjekte an. Dazu wurde das Programmierparadigma objektorientierte Programmierung gewählt. Dieses ermöglicht eine übersichtliche Strukturierung und eine Verringerung der Komplexität und Redundanz. Die Folge ist eine

einfachere Handhabung und Lesbarkeit des Codes und die Möglichkeit der Wiederverwendung für ähnliche Problemstellungen.

6 Simulationsergebnisse

Basierend auf der Speicherbewirtschaftungsstrategie werden Berechnungen mit verschiedenen Eingangsprofilen und Konfigurationen durchgeführt. Zuerst wird das Entladeverhalten der Speicher bei einem negativen Eingangssprung gezeigt. Danach wird das Ladeverhalten bei einer konstanten positiven Eingangsleistung analysiert. Schließlich erfolgt die Berechnung der Speicherbewirtschaftung über einen vierjährigen Zeitabschnitt auf Basis des Gesamtstromverbrauchs von 2008. Zum Schluss wird die maximale Laststeigerung ermittelt, ab der die Speicherverluste überhand nehmen und ein Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch nicht mehr möglich ist.

6.1 Einmaliges Entladen

Wird als Eingangsgröße eine Sprungfunktion angelegt, kann das Entladeverhalten der Speicher berechnet werden. Dazu wird ein konstantes Defizit über 1 Jahr als Eingangsgröße gewählt, dessen Wert größer als die Summe aller Engpassleistungen der Speicher ist. Der Wasserstoffspeicher wird hierfür nicht verwendet. Weiter wird angenommen, dass die Speicherstände aller Speicher zum Zeitpunkt Null voll sind.

Um die Entladungseigenschaften des gesamten Speichersystems ohne natürlichen Zufluss zu betrachten werden die Regelarbeitsvermögen aller Kraftwerke auf null gesetzt. Bei Berücksichtigung des natürlichen Zuflusses ist der Zeitpunkt des Beginns des Entladevorgangs mitentscheidend. Dieser wurde für die Darstellung des Entladeverhaltens mit Anfang Oktober gewählt, da ab diesem Zeitpunkt die Differenz von Erzeugung und Last über einen Tag gesehen zumeist negativ wird.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 4 dargestellt. Alle Speicherstände werden für die Summendarstellung für jede Stunde addiert. Die Leistungskurve ist die Summe der Differenz der Eingangsenergie zur Ausgangsenergie der Speicher pro Stunde.

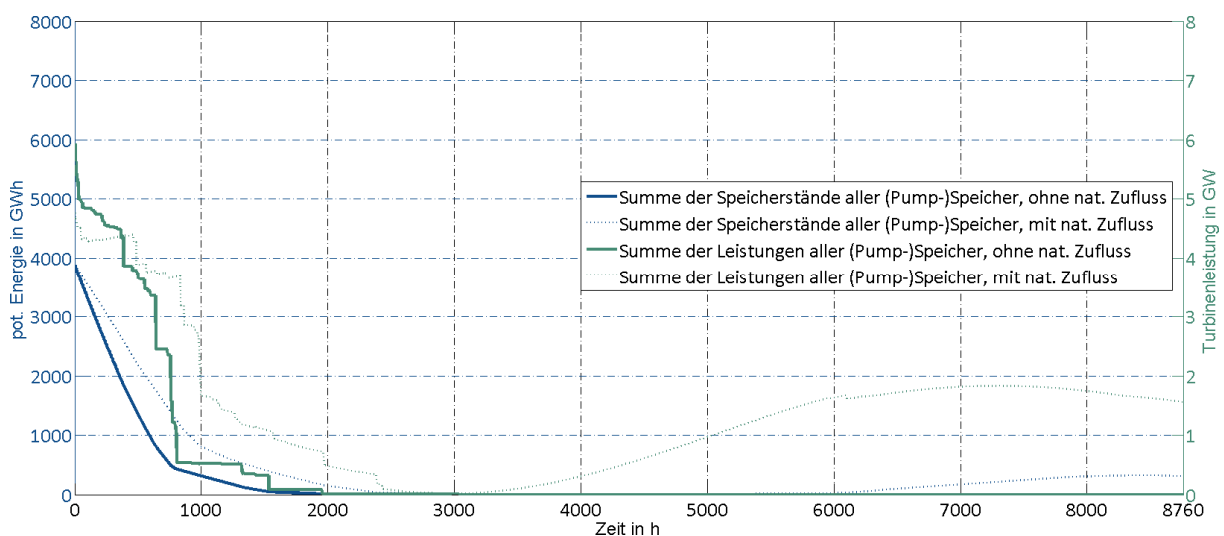


Abbildung 4: Entladen aller (Pump-)Speicherkraftwerke mit und ohne Berücksichtigung des natürlichen Zuflusses

Berücksichtigt man den natürlichen Zufluss nicht, ist zu erkennen, dass hohe Leistungen nur für einen sehr kurzen Zeitraum zur Verfügung stehen. Nach 2000h sind alle Speicher praktisch entleert. Der Energieinhalt des Systems von anfänglich knapp 4TWh ist ebenfalls nach 2000h nahezu null.

Wird der Zufluss in die Simulation einbezogen, erreicht dieser von Oktober beginnend nach 3000h sein Minimum. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die verfügbare Leistung am geringsten. Der Speicherstand des Gesamtsystems hat ebenfalls nach knapp 3000h seinen Minimalstand erreicht und steigt danach wieder leicht an. Grund dafür sind bestimmte Kraftwerkskonstellationen, die Engpässe zwischen zwei Kraftwerksstufen aufweisen.

6.2 Einmaliges Aufladen

Nach den Entladeeigenschaften des Speichersystems wird in diesem Abschnitt das Ladeverhalten analysiert. Für den einmaligen Ladevorgang wird als Eingangsleistungsprofil ein konstanter Überschuss benötigt, der größer als die maximale kumulierte Pumpleistung des Systems gewählt wird.

Wird der natürliche Zufluss nicht berücksichtigt, ist es nicht möglich, die Berechnung bei leeren Speichern durchzuführen, da zu wenig Wasser für die Pumpvorgänge zur Verfügung stehen würde. Daher werden jeweils die Speicher der Unterstufen pumpfähiger Kraftwerke als gefüllt angenommen.

Wird der natürliche Zufluss beim Ladevorgang berücksichtigt, ist der Startpunkt des Ladevorgangs mitentscheidend für den Verlauf der Speicherstände. Es wird Anfang April als Zeitpunkt für den Beginn der Berechnung gewählt. Ab diesem Zeitpunkt steht typischerweise mehr Erzeugung als Verbrauch zur Verfügung und die Speicher beginnen sich zu füllen. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Abbildung 5 dargestellt.

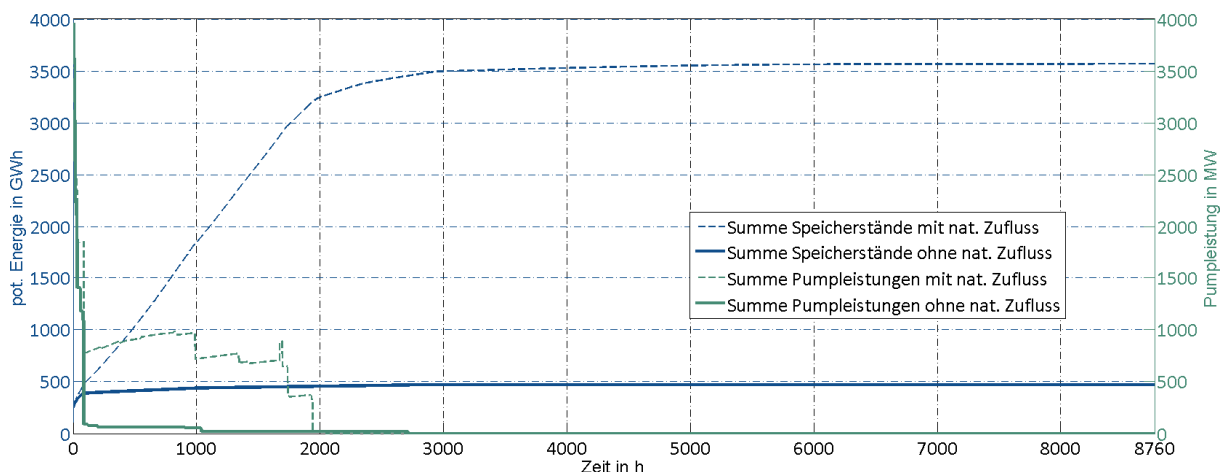


Abbildung 5: Einmaliges Aufladen aller (Pump-) Speicherkraftwerke mit und ohne Berücksichtigung des natürlichen Zuflusses

Berücksichtigt man den natürlichen Zufluss im Modell nicht steht die maximale Pumplleistung nur zu einem sehr kurzen Zeitraum zur Verfügung. Nach rund 100h ist ein Großteil des Wassers bereits in die Oberbecken gepumpt worden. Der Speicherstand des Gesamtsystems erreicht seinen Maximalstand nach 2500h, nachdem die letzten

Pumpvorgänge abgeschlossen sind. Dieser beträgt nur rund 450GWh, da nur das Wasser der Unterstufen der Pumpspeicherkraftwerke im System vorhanden ist.

Mit natürlichem Zufluss füllen sich die Speicher zusätzlich zu den Pumpvorgängen auch von alleine. Dadurch steht mehr Pumpleistung zur Verfügung und der kumulierte Speicherstand aller Speicher steigt auch nach Beendigung der Pumpvorgänge weiter kontinuierlich an.

6.3 Speicherbewirtschaftung ohne Verbrauchssteigerung

Ziel der Speicherbewirtschaftung ist die Berechnung der Speicherstände der verfügbaren Speicher unter der Voraussetzung, dass die Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt gedeckt wird. Da wie sich zeigen wird, die (Pump-)Speicher energetisch und leistungsmäßig nicht ausreichen, um das Differenzprofil aus erneuerbarer Erzeugung und dem Verbrauch zu decken, wird als Ergänzung ein Wasserstoffspeicher zu Hilfe genommen. Daher ist auch die maximale Speichergröße dieses zusätzlichen Speichers von Interesse.

Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wird als Betrachtungszeitraum die ersten 4 Jahre des zur Verfügung stehenden 15-jährigen Differenzprofils gewählt. Diese sind unterdurchschnittliche Erzeugungsjahre. Es hat sich gezeigt, dass der höchste Speicherbedarf im dritten Jahr dieses 15-jährigen Profils benötigt wird. Daher wird für die Berechnung der maximalen Speichergröße des Wasserstoffspeichers dieser vierjährige Ausschnitt als ausreichend empfunden.

6.3.1 Speicherbewirtschaftung: (Pump-) Speicher

In einem ersten Schritt werden die Ausgleichsmöglichkeiten der (Pump-)Speicherkraftwerke Österreichs zur Deckung des Verbrauchs untersucht. Basierend auf den erhobenen Kraftwerksbestand dient das Differenzprofil der ersten 4 Jahre als Input für die Speicherbewirtschaftung. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

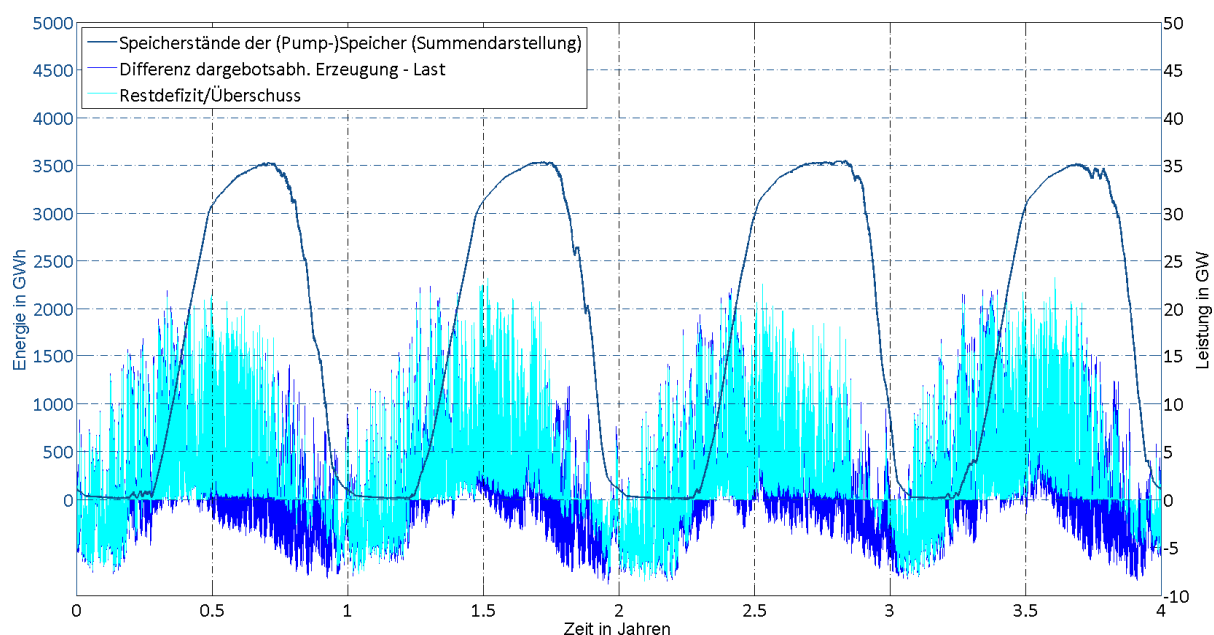


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Speicherstände der österr. (Pump-) Speicherkraftwerke über einen Betrachtungszeitraum von 4 Jahren [1]

Da im vierjährigen Betrachtungszeitraum ein Restdefizit auftritt, kann eine Vollversorgung Österreichs nicht gewährleistet werden. Speziell in den Wintermonaten genügen die installierten Speicherkapazitäten nicht aus, um den Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch zu bewerkstelligen. Betrachtet man die fallenden Flanken des kumulierten Speicherstandes ist zudem ersichtlich, dass obwohl noch gespeicherte Energie vorhanden wäre, eine negative Leistungsdifferenz auftritt. Dies zeigt deutlich, dass auch die installierten Engpassleistungen der Speicher nicht ausreichen. Die verfügbaren (Pump-) Speicherkraftwerke können eine Versorgung Österreichs mit Strom aus erneuerbaren Quellen somit nur in den Sommermonaten ausgleichen. In dieser Periode nimmt die verbliebene ungenutzte Erzeugung keine negativen Werte an.

Der Speicher-Saldo liegt im Betrachtungszeitraum bei durchschnittlich 20,3TWh pro Jahr. Er setzt sich aus dem Regelarbeitsvermögen und dem Energieüberschuss der Erzeugung nach Abzug der Last zusammen. Bei der Speicherung treten Verluste von 2,4TWh auf, 25TWh an regenerativer Erzeugung können aufgrund der beschränkten Speicherkapazität nicht genutzt werden. Insgesamt können 7,1TWh an Last nicht gedeckt werden.

6.3.2 Speicherbewirtschaftung: Wasserstoffspeicher

In dieser Berechnung wird alleine mit Hilfe des Wasserstoffspeichers versucht, die Residuallast zu decken. Das Ergebnis über den gewählten vierjährigen Zeitraum ist in Abbildung 7 dargestellt.

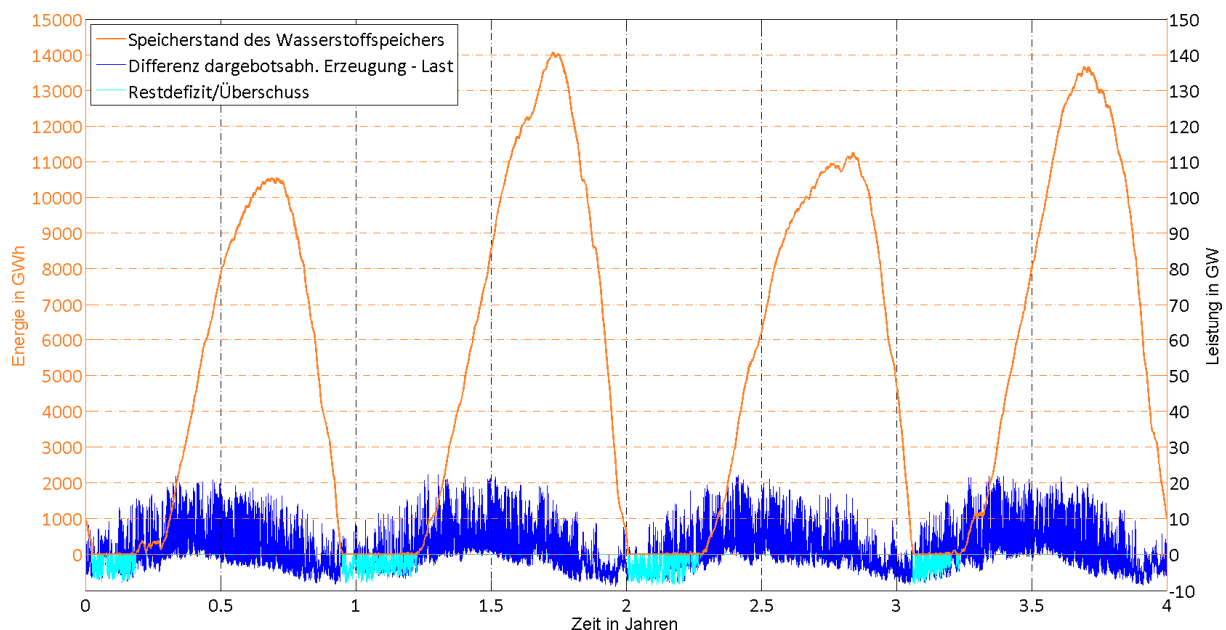


Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung des Speicherstands eines fiktiven Wasserstoffspeichers bei einer Speicherbewirtschaftung über 4 Jahre [1]

Die Überschussenergie des Residuallastprofils reicht nicht aus, um die Leistungsdifferenz für jede Stunde zu decken. Der Wasserstoffspeicher kann somit unter den angenommenen Wirkungsgraden für die Speicherung und Erzeugung von Strom die Leistungsdifferenz pro Stunde nicht alleine bewältigen. Diese Tatsache spiegelt sich auch im Ergebnis der Gesamtverluste (15,1TWh) wieder, deren Summe über dem Speicher-Saldo (9,9TWh) liegt.

6.3.3 Speicherbewirtschaftung: (Pump-)Speicher und Wasserstoffspeicher

Werden die (Pump-)Speicherkraftwerke Österreichs gemeinsam mit dem fiktiven Wasserstoffspeicher als Ergänzung eingesetzt, stellt sich das Ergebnis in Abbildung 8 ein.

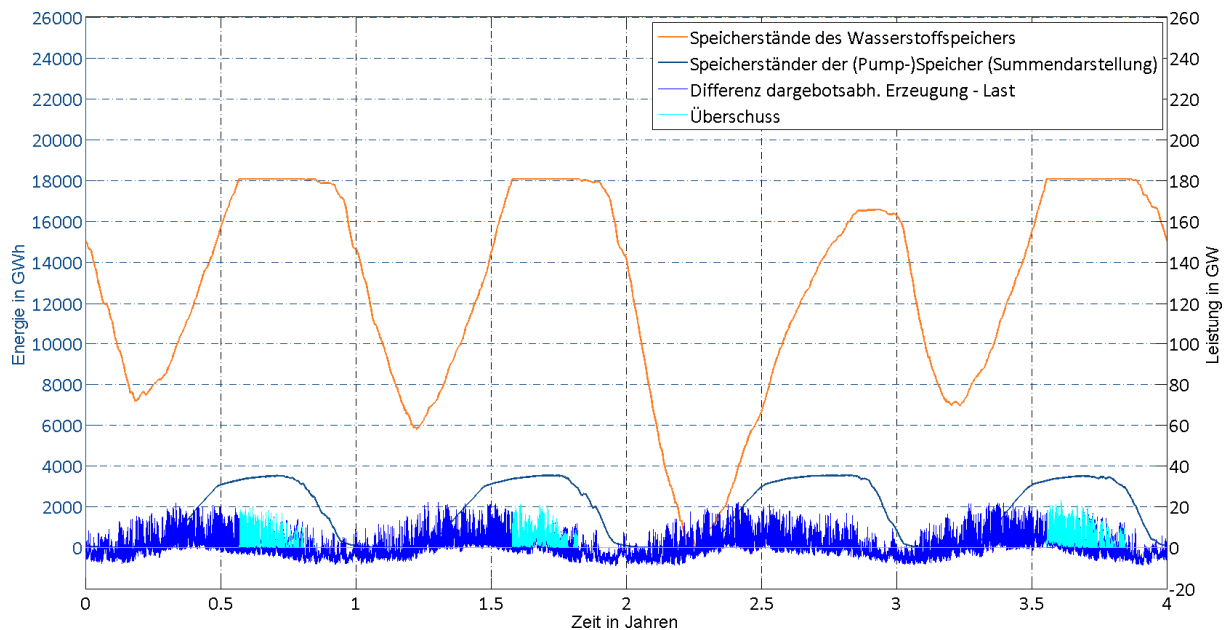


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der Speicherstände aller (Pump-) Speicher bei einer Speicherbewirtschaftung über 4 Jahre in Summendarstellung [1]

Die Kombination der (Pump-)Speicherkraftwerke mit dem fiktiven Wasserstoffspeicher ermöglicht einen Ausgleich der Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch. Die maximale Elektrolyseleistung beträgt rund 23,2GW, die Brennstoffzellenleistung 8,5GW. Die benötigte maximale Speichergröße des Wasserstoffspeichers ergibt sich zu rund 18TWh. Umgerechnet sind dies rund 6 Mrd.Nm³. Das ist knapp 5-mal mehr, als der maximale kombinierte Energieinhalt aller Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke (3,5TWh). Offensichtlich kann speziell in den Wintermonaten die höhere Differenz zwischen Erzeugung und Last nur durch massiven Einsatz des Wasserstoffspeichers ausgeglichen werden. Der hohe Anteil der Photovoltaik an der Gesamterzeugung und deren Erzeugungsrückgang im Winter, sowie der gesteigerte Stromverbrauch in dieser Zeit, sind die Haupteinflussfaktoren hierfür. Zusätzlich ist zu dieser Zeit auch der natürliche Zufluss der Speicher am geringsten, was zu einer Verstärkung dieser Problematik beiträgt. Im Sommer führt die hohe Stromerzeugung gepaart mit dem niedrigen Verbrauch zu einem hohen Stromüberschuss. Auch der natürliche Zufluss erreicht sein Maximum in dieser Zeit. Die überschüssige Energie wird verlustreich in Wasserstoff umgewandelt, um in den Wintermonaten den Verbrauch zu decken. Die Speicherverluste kumulieren sich jährlich im Durchschnitt zu 14,3TWh. Damit werden rund 70% des Speicher-Saldos (20,3TWh/a), welche die Summe des positiven Anteils des Differenzprofils und dem Regelarbeitsvermögen ist, benötigt. Die nicht genutzte Erzeugung beträgt jährlich durchschnittlich 6TWh und fällt nur in den Sommermonaten an.

Eine Detailansicht aller beteiligten (Pump-) Speicherkraftwerke findet man in Abbildung 9. In ihr ist zu erkennen, dass die Speicherstände in den Wintermonaten nahezu alle leer sind. Erst im April beginnen sich die großen Speicher langsam zu füllen. Ab Oktober ist zu erkennen, dass die Entladung des Systems einsetzt. Im Prinzip vollführen die Speicher daraufhin eine Vollentladung, die nach 3000h vollzogen ist

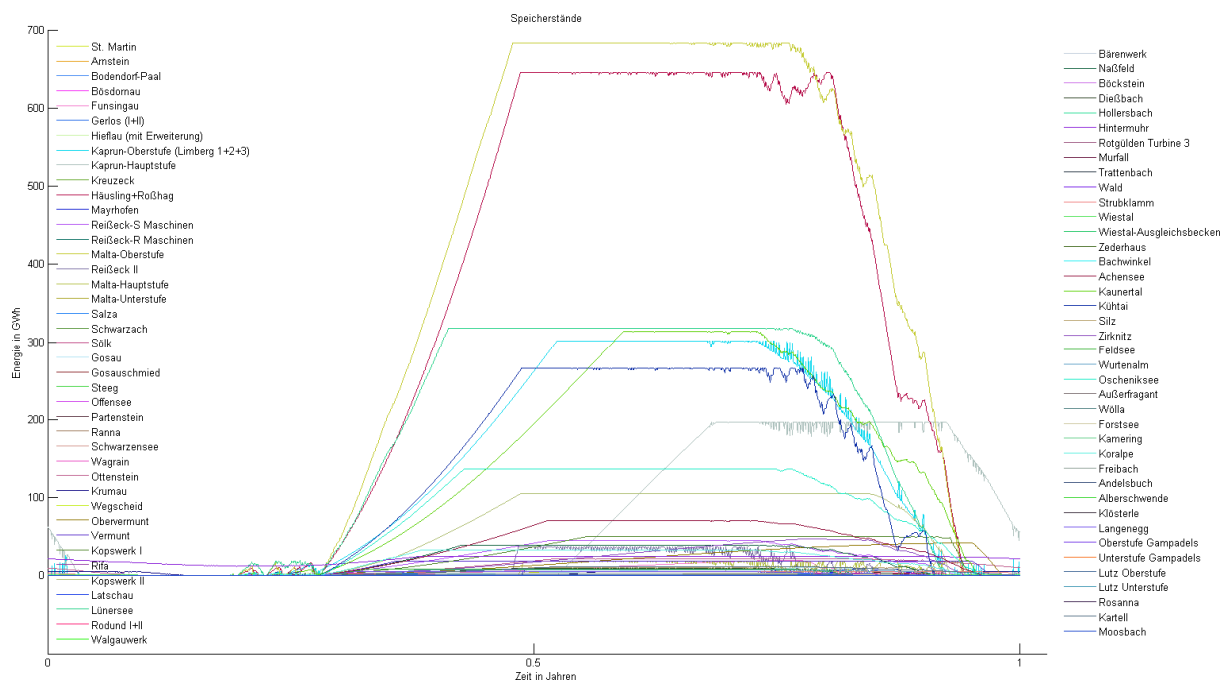


Abbildung 9: Detaildarstellung der zeitlichen Entwicklung der Speicherstände aller (Pump-) Speicherkraftwerke [1]

6.4 Speicherbewirtschaftung mit Verbrauchssteigerung

Für die Berechnung des maximalen Laststeigerungspotenzials wird der Verbrauch, bei gleichbleibender Erzeugung, solange gesteigert, bis die verbleibende nicht genutzte Erzeugung gegen Null geht.

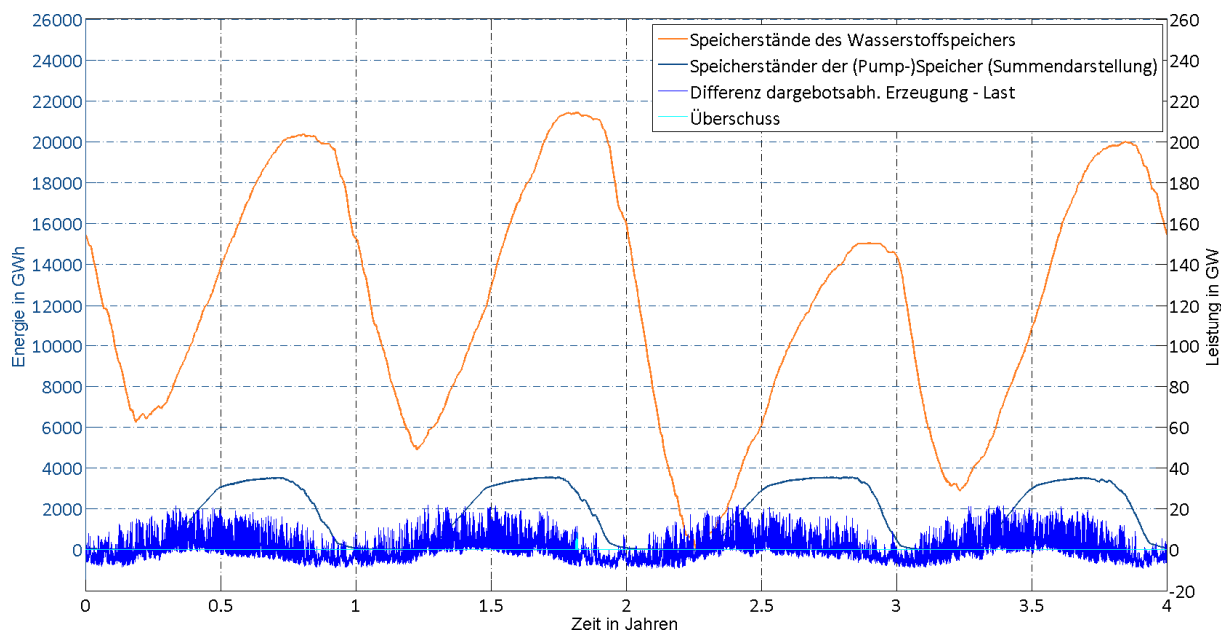


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der Speicherstände aller (Pump-) Speicher bei einer Speicherbewirtschaftung mit maximaler Laststeigerung über 4 Jahre [1]

Die Erhöhung der Last führt zu einem Anstieg des Speicherbedarfs des Wasserstoffspeichers. Dieser steigt von 18TWh (6 Mrd. Nm³) um 18,1% auf 21,4TWh (7,1 Mrd. Nm³) an. Im Gegenzug sinkt der Speicher-Saldo von rund 20,3TWh um 17,2% auf

16,8TWh. Die Last kann um 5% im Vergleich zum Verbrauch von 2008 gesteigert werden. Die Speicherverluste kumulieren sich ebenfalls auf 16,8TWh. Die maximale Elektrolyseleistung sinkt auf 22,9GW, die Brennstoffzellenleistung steigt auf 9GW.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf des Speicherstands des Wasserstoffspeichers und der Summenspeicherstände der (Pump-) Speicherkraftwerke. Der maximale Speicherstand des Wasserstoffspeichers wird nur mehr im zweiten Jahr erreicht. Über den ganzen Betrachtungszeitraum wird die gesamte positive Differenzenergie aus dargebotsabhängiger Erzeugung und Verbrauch zur Speicherung genutzt. Daraus ist auch ersichtlich, dass zu jedem Zeitpunkt die Last über den vierjährigen Zeitraum gedeckt ist.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Betrieb des Stromnetzes nur mit Strom aus erneuerbaren Quellen kann ohne Hilfe von zusätzlichen Speichern nicht gewährleistet werden. Vor allem in den Wintermonaten fehlt es an Speicherkapazitäten. In den Sommermonaten hingegen übersteigt der Überschuss die Möglichkeiten der (Pump-)Speicher zur Konservierung dieser Energie. Energie muss ungenutzt abgewiesen werden.

Ein in dieser Arbeit diskutierter ergänzender Speicher basierend auf der Wasserstofftechnologie ermöglicht den Ausgleich der Differenz von Erzeugung und der Last auf Basis des Stromverbrauchs von 2008. Die benötigte maximale SpeichergroÙe des Wasserstoffs beträgt rund 18TWh. Dies ist im Vergleich zu 3,5TWh an kombiniertem Energieinhalt der (Pump-) Speicherkraftwerke knapp 5-mal so viel. Die Verluste dieser Speicherung in Kombination mit den verlustarmeren (Pump-)Speichern betragen bereits zwei Drittel der Reserveerzeugung.

Die durchschnittliche regenerative Erzeugung beträgt in den betrachteten vierjahigen Zeitraum knapp 89TWh und liegt damit um 2TWh niedriger, als im 15-jahigen Durchschnitt. Sie ist die maximale kombinierte Erzeugung aus Windkraft, Photovoltaik, Lauf- und Speicherwasserkraft und sowohl beim Referenzszenario 2008, als auch bei der Speicherbewirtschaftung bei maximaler Last gleich.

Nimmt man den Stromverbrauch Österreichs von 2008 als Ausgangsbasis, steht pro Jahr ein durchschnittlicher Speicher-Saldo von 9,9TWh zur Verfügung. Zusätzlich kommen noch 10,4TWh pro Jahr an Energie aus dem natürlichen Zufluss der Speicherkraftwerke. Von diesen insgesamt 20,3TWh Überangebot an Energie bleiben bis zu 6TWh pro Jahr ungenutzt. Sieht man den Stromverbrauch als konstant an, könnte diese Energie, die nur in den Sommermonaten anfällt, aus dem System ausgekoppelt und anderwärtig Verwendung finden.

Geht man jedoch von einem wachsenden Stromverbrauch in Österreich aus, erreicht man ab einer gewissen Verbrauchssteigerung den Punkt, an dem die zusätzlich aufzubringenden Speicherverluste die Reserveerzeugung übertreffen. In der Arbeit wird bei einem vierjahigen Betrachtungszeitraum ein Laststeigerungspotenzial von 5,0% auf Basis des Gesamtstromverbrauchs des Jahres 2008 berechnet.

Bei den Ergebnissen auf Basis des Verbrauchs von 2008 beansprucht die Last 68,6TWh und die Speicherverluste summieren sich auf 14,3TWh. Die Differenz auf die Erzeugung ist von den Speichern ungenutzte Energie und beträgt knapp 6TWh.

Betrachtet man die Resultate der Speicherbewirtschaftung bei maximaler Last, so kann der Verbrauch um durchschnittlich 3,4TWh pro Jahr im Vergleich zu jenem von 2008 gesteigert werden. Im gleichen Zug erhöhen sich die Speicherverluste um 2,5TWh auf 16,8TWh. In relativen Zahlen ausgedrückt, steigen die Speicherverluste bei einer Laststeigerung von 5% um 17,6% an (siehe Abbildung 11).

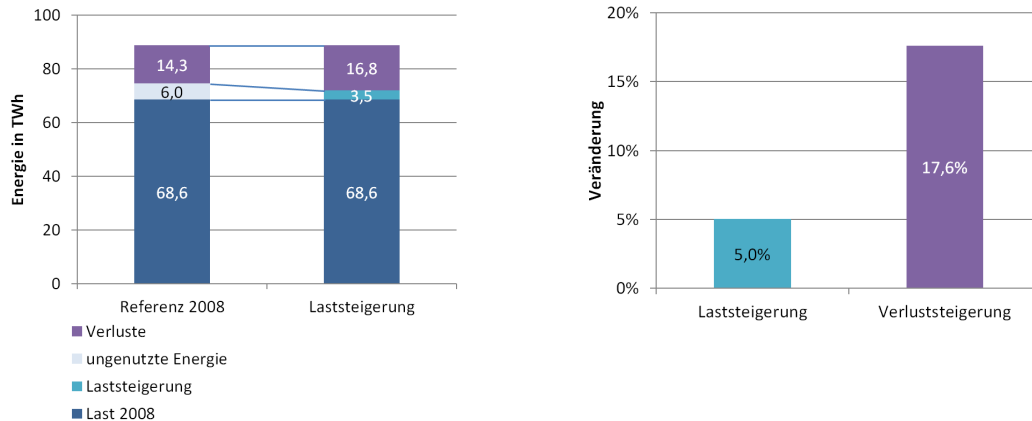


Abbildung 11: Vergleich der Speicherbewirtschaftung bei maximaler Last mit der Speicherbewirtschaftung auf Basis des Verbrauchs von 2008

Zurückzuführen ist diese progressive Verluststeigerung auf die erhöhten Anforderungen an den Wasserstoffspeicher, dessen maximaler Speicherbedarf von 18,1TWh auf 21,4TWh anwächst. Da der angenommene Strom-zu-Strom Wirkungsgrad des Wasserstoffspeichers von 37,2% deutlich niedriger als 80% Wirkungsgrad der Pumpspeicherkraftwerke ist, kommt diese überproportionale Verluststeigerung zu Stande.

Literatur

- [1] C. Maier, *Zukünftige Speicherbewirtschaftung bei regenerativer Stromerzeugung am Beispiel Österreichs*, TU Wien, 2012.
- [2] TU Wien, ESEA-EA, *"Super-4-Micro-Grid"-Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel*, FFG-KLIEN, 2011.
- [3] F. Crotagino und R. Hamelmann, *Wasserstoff-Speicherung in Salzkavernen zur Glättung des Windstromangebots*, REGWA 2007, Stralsund, Tagungsband 11-17, 2007.
- [4] Wikipedia, *Wasserelektrolyse* - Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserelektrolyse>, [Online; Stand 20. April 2012].
- [5] Wikipedia, *Wasserstoffspeicherung* - Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung>, [Online; Stand 21. April 2012].
- [6] T. Lemmerer, *Optimale Speicherbewirtschaftung: Eine empirische Anwendung auf Österreich*, 1987.