

# 100% REGENERATIVES ÖSTERREICH - ENERGIE & LEISTUNG

Christoph GROISS\*<sup>1</sup>, Martin BOXLEITNER\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
Gußhausstraße 25/370-1, 1040 Wien, Austria  
Tel.: +43 | (0)1 | 58801 | 370126, Fax: +43 | (0)1 | 58801 | 370199  
e-Mail: [groiss@ea.tuwien.ac.at](mailto:groiss@ea.tuwien.ac.at), [boxleitner@ea.tuwien.ac.at](mailto:boxleitner@ea.tuwien.ac.at),  
Web: [www.ea.tuwien.ac.at](http://www.ea.tuwien.ac.at)

**Kurzfassung:** Im Projekt „Super-4-Micro-Grid – Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel“ lautet die zentrale Fragestellung:

„Ist eine regenerative Vollversorgung Österreichs im Bereich der Elektrizität überhaupt möglich, und wenn ja, wie?“

In diesem Paper wurden dazu die beiden Teilaspekte der regenerativen Erzeugungspotenziale und die dabei auftretenden Einspeiseleistungen untersucht.

Als Datenbasis dienen langjährige Messungen von Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung an rund 100 Stationen. Die Potenzialflächenerhebung liefert unter Berücksichtigung von Restriktionen die installierbare Wind- und Photovoltaikleistung. In Kombination mit der Standortqualität berechnet sich das regenerative Erzeugungspotenzial.

Die Untersuchung zeigt, dass die regenerativen Erzeugungspotenziale aus Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik in Österreich rund 91 TWh/a betragen. Somit ist eine energetische Deckung der Last aus dem Jahr 2008 von 69 TWh/a mit einer Verbrauchssteigerung von bis zu 25 % möglich.

Die Analyse der Einspeiseleistungen zeigt, dass die überschüssige Leistung (also bereits abzüglich der Last) mit Spitzen von etwa 10 bis 20 GW die verfügbare Pumpleistung von ca. 5 GW deutlich übersteigt. Das Speichervermögen der Pumpspeicher ist mit 0,14 TWh deutlich geringer als der gesamte Erzeugungsüberschuss von ca. 10 TWh. Somit kann die Pumpspeicherung für kurzfristige Ausgleichsvorgänge, nicht jedoch für die Langzeitspeicherung verwendet werden.

**Keywords:** Regenerative Erzeugung, Erzeugungspotenziale, Speicherkraftwerke

## 1 Einleitung

Die zunehmende Verknappung fossiler Energieträger sowie der Klimawandel erfordern eine Veränderung der derzeitigen Energieaufbringung. Der Übergang hin zu regenerativen Erzeugern wirkt sich neben der Unabhängigkeit bezüglich Energieimporten auch auf die Schadstoffemission positiv aus.

Im Projekt „Super-4-Micro-Grid – Nachhaltige Energieversorgung im Klimawandel“ wurde diese Thematik als Anlass genommen, um den Extremfall einer rein regenerativen

Elektrizitätsversorgung zu untersuchen. Als Erzeugungseinheiten wurden nur dargebotsabhängige, regenerative Einspeiser betrachtet. Diese sind Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik. Österreich wird dabei als Insel modelliert. Somit stellen Importe aus dem Ausland keine Möglichkeit dar, um Defizite im Inland auszugleichen. Diese Unabhängigkeit wird in zwei Stufen untersucht:

- **Energieautarkie:** der Inlandsverbrauch muss durch regenerative Erzeugungsanlagen innerhalb Österreichs gedeckt werden
- **Leistungsautarkie:** diese Forderung geht über den Punkt „Energieautarkie“ hinaus. Hier müssen die Erzeugung und der Verbrauch in Österreich zu jedem Zeitpunkt und nicht nur die Jahressumme übereinstimmen.

Die Differenzen aus dargebotsabhängiger Erzeugung und dem Verbrauch können nur durch Speicher gedeckt werden. Der daraus resultierende Speicherbedarf und die Speicherbewirtschaftung werden im Beitrag [6] behandelt. Die Belastung des Übertragungsnetzes durch den weiträumigen Energietransport wird im Paper [5] beschrieben.

Die aufgeführten Teilfragen bezüglich Energieautarkie, Leistungsautarkie, Speicherbedarf und Netzbelastung beantworten insgesamt die zentrale Frage des Forschungsprojektes:

„Ist eine regenerative Vollversorgung Österreichs im Bereich der Elektrizität überhaupt möglich, und wenn ja, wie?“

## 2 Regenerativen Erzeugungspotenziale

In diesem Kapitel wird die Erhebung der Potenziale an regenerativer, dargebotsabhängiger Erzeugung in Österreich bestimmt. Neben der regionalen Verteilung von Windkraft- und Photovoltaikpotenzialen werden der aktuelle Ausbaugrad der Wasserkraft sowie der derzeitige österreichische Stromverbrauch beschrieben.

### 2.1 Regionalisierung

Zur Beschreibung von regional unterschiedlichen Einspeiseverhalten und zur Beurteilung von überregionalen Ausgleichseffekten wurde Österreich in 8 Regionen unterteilt. Diese sind in Abbildung 1 eingezeichnet. Die Regionalisierung wurde hinsichtlich der Globalstrahlungs- und Windcharakteristik vorgenommen. Jedes Gebiet weist diesbezüglich homogene Eigenschaften auf. Für die Erzeugung aus Laufwasserkraft sowie dem Stromverbrauch wurde ebenfalls mit dieser Regionalisierung gearbeitet.

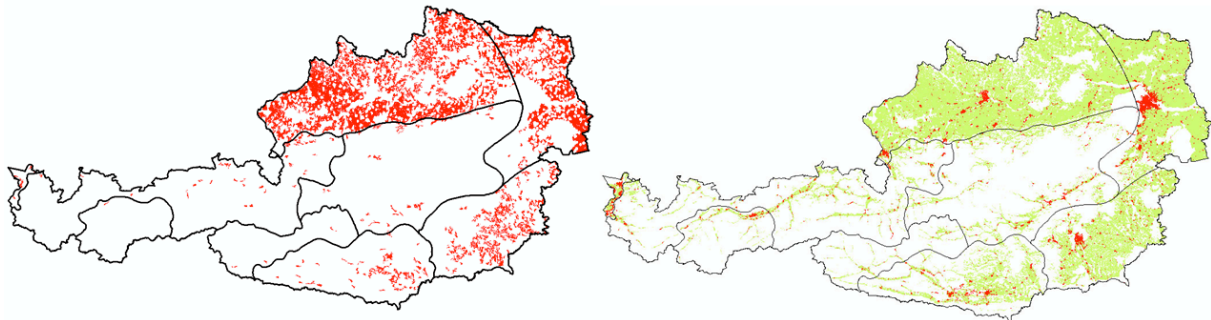
### 2.2 Windkraft und Photovoltaik

Den ersten Schritt bildet die Erhebung der regenerativen Erzeugungspotenziale in Österreich. Im Bereich der Windkraft und der Photovoltaik beruhen die Potenzialabschätzungen auf der Erhebung der Flächenpotenziale. Dies erfolgt durch den Einsatz einer Geo-informations-Software (GIS-Software).

Unter Berücksichtigung verschiedener Ausschlusskriterien wird die theoretisch verfügbare Fläche berechnet. Im Wesentlichen bestehen die Restriktionen aus:

- Flächennutzung
- Naturschutzgebiete
- Zugänglichkeit
- erzielbarer Jahresertrag

Im Bereich der Photovoltaik wird zusätzlich zwischen bebauten Potenzialflächen für gebäudeintegrierten Anlagen und den Freiflächen unterschieden. Die Details zur Bestimmung der Potenzialflächen sind in [1] und [2] beschrieben. Die Ergebnisse der Erhebung sind in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Flächenpotenziale für Windkraft (linke Abb.) und Photovoltaik (rechte Abb., grün: Freiflächen, rot: Gebäudeintegrierte Photovoltaik) in Österreich unter technisch-rechtlichen Restriktionen [2],[1]

Im nächsten Schritt wird nun berechnet, wie hoch die installierbare Leistung pro Fläche ist. In [2] wird von der Verwendung von 2 MW Windanlage mit einem Rotordurchmesser von 85 m ausgegangen. Weiters wurde ein Abstand von sieben Rotordurchmessern in Hauptwindrichtung und fünf Rotordurchmesser normal zur Hauptwindrichtung angenommen. Unter Berücksichtigung eines nicht idealen rasterförmigen Aufbaus ergibt sich eine Leistungsdichte von  $6 \text{ MW/km}^2$ , welche in weiterer Folge verwendet wird. Anhand von Erfahrungswerten bei bereits dicht verbauten Standorten wird angenommen, dass 10 % der Roh-Potenzialfläche tatsächlich für Windkraft genutzt werden kann. Dies ist durch die Konkurrenz zu anderen Nutzformen dieser Flächen begründet. Insgesamt ergibt sich daraus eine installierbare Leistung von rund 6 GW an Windkraft in Österreich.

Der Gesamtertrag der Windkraft hängt von der Standortqualität ab. Diese wird anhand von rund 100 Messstationen über den Zeitraum von 15 Jahren berechnet. Für jede dieser Messstationen wurde die umliegende Potenzialfläche bestimmt, um die jeweils installierbare Leistung zu berechnen. Durch Multiplikation der Vollaststunden mit der installierten Leistung wird somit die regionale Jahreserzeugung berechnet. Die Summe über alle Stationen ergibt die maximal mögliche österreichweite Windkrafterzeugung eines Durchschnittsjahres.

Im Bereich der Photovoltaik liegt die analoge Problemstellung vor, dass von der Roh-Potenzialfläche auf die maximal installierbare Leistung umgerechnet werden muss. Die Wahl der verwendeten Modultechnologie bestimmt die installierbare Leistung pro Fläche wesentlich. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellen polykristalline Zellen die wirtschaftlichste

Lösung für Freiflächenanlagen dar. Es wird daher im Folgenden von einem mittleren Modulwirkungsgrad von 12 % ausgegangen. [10] Der Modulwirkungsgrad beeinflusst nicht die Volllaststunden einer PV-Anlage (kWh/kWp). Er wirkt sich nur auf die benötigte Modulfläche aus, um einen gewünschten Wert an installierter Anlagenleistung zu erreichen.

Die Modulnennleistung wird bei einer Einstrahlung von 1.000 W/m<sup>2</sup> bestimmt. Bei einem Wirkungsgrad von 12 % beträgt somit die bezogene Modulleistung 120 Wp/m<sup>2</sup>. Um gegenseitige Abschattung der Module zu vermeiden müssen Freiräume zwischen den Anlagen vorgesehen werden. Hierfür wurde ein Verhältnis von 1:4 für Modulfläche zu Grundfläche angenommen. Weiters muss der Platzbedarf für Zufahrtswege, Umrichter sowie Transformatoren berücksichtigt werden. In weiterer Folge wird von einer Gesamtflächenausbeute von 25 MW/km<sup>2</sup> [12] ausgegangen.

Ebenso wie bei der Windkraft gilt auch für Photovoltaikanlagen, dass nicht die vollständige theoretische Potenzialfläche für Erzeugungsanlagen verwendet werden kann. Der Nutzungsgrad von landwirtschaftlichen Flächen zur Energieerzeugung ist mit Unsicherheit behaftet. In weiterer Folge wird dieser mit 3 % der verfügbaren Potenzialfläche angenommen. [11]

Im Bereich der Gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV) wurden die Ergebnisse verschiedenen Untersuchungen für das Potenzial in Österreich verglichen ([8, S.99], [9], [10, S.7] und [11, S.189]). Der Unterschied zwischen diesen vier Studien kann vor allem über einen unterschiedlichen Wirkungsgrad der PV-Anlagen begründet werden. Wird für alle Studien der Wirkungsgrad von 12 % angenommen, so ergibt sich bei den Untersuchungen jeweils eine Gesamterzeugung an BIPV von 20 TWh (16 TWh Dach + 4 TWh Fassade), welche einer installierten Leistung von 23 GW entspricht. Mit der zuvor beschriebenen GIS-Analyse wurde die Verteilung der verbauten Flächen bestimmt. Anhand dieser erfolgte die Zuordnung des Gesamtpotenzials zu den definierten Regionen.

### **2.3 Laufwasserkraft**

Im Bereich der Wasserkraft wird als Ausbauszenario das reduzierte technisch-wirtschaftliche Restpotenzial der Studie (Pöyry Energie GmbH, 2008) herangezogen. Diese Potenziale verringern sich um die Auswirkungen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).

Für Österreich beträgt das reduzierte technische Restpotenzial 12.700 GWh/a. Abzüglich der Verluste durch die WRRL welche mit 1.864 GWh/a angenommen wurde, ergibt sich ein Zubaupotenzial von 10.836 GWh/a.

Der aktuelle Ausbaugrad der Laufwasserkraft liefert eine mittlere Jahreserzeugung von 30.968 GWh/a. Zusätzlich liefern die Speicherkraftwerke aus natürlichem Zufluss ein Regelarbeitsvermögen von 10.288 GWh/a. [7]

### **2.4 Verbrauch**

Die Verbrauchsdaten für Österreich stehen auf Bundesländerebene zur Verfügung [7]. Weiters gibt Statistik-Austria die Einwohnerzahl nach Bezirken an. Mit dem Pro-Kopf-Verbrauch je Bundesland wurde der Bezirksverbrauch berechnet. Mit Hilfe einer GIS-Software wird zunächst die Flächenzugehörigkeit der einzelnen Bezirke zu den Regionen

ermittelt. Entsprechend der Flächenanteile wird der Bezirksverbrauch zu den Regionen zugeordnet. Die Summe über diese Verbrauchsanteile ergibt den energetischen Verbrauch pro Region. Im Jahr 2008 lag der Inlandsstromverbrauch in Österreich bei 68.646 GWh/a. [7]

## 2.5 Potenziale – Ergebnisse

Die erhobenen regenerativen Erzeugungspotenziale für Österreich sind in Tabelle 1 zusammengefasst

**Tabelle 1:** Regenerative Erzeugungspotenziale in Österreich

Speicherkraftwerke	10 TWh/a
Laufwasserkraft (inkl. Zubau)	42 TWh/a
Windkraft	8 TWh/a
Photovoltaik	31 TWh/a
<b>Gesamterzeugung</b>	<b>91 TWh/a</b>

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, unterliegen die Potenziale der Windkraft und Photovoltaik noch der Unsicherheit bezüglich der tatsächlich verwendeten Fläche. Weitere Fragen betreffen den Ausbau der Wasserkraft. Die größte Unsicherheit stellt aber die Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs dar.

Um diese Unsicherheiten bestmöglich behandeln zu können, wurden die wichtigsten Parameter variiert und daraus sechs Szenarien erstellt. Im Bereich der Laufwasserkraft wurde zwischen dem aktuellem Ausbaugrad und dem Zubau des technisch-wirtschaftlichen Restpotenzials unterschieden (siehe Kapitel 2.3). Im Bereich des Verbrauchs wurde zwischen dem Verbrauch aus dem Jahr 2008, einer 25 %-igen Verbrauchssteigerung und einer 100 %-igen Verbrauchssteigerung gegenüber 2008 variiert. Dabei entspricht die 25 % Verbrauchssteigerung bis 2050 einem jährlichen Zuwachs von 0,53 %/a. Die Verdopplung des Verbrauchs entspricht einer Rate von 1,66 %/a. Die Übersicht der Szenarien ist in Abbildung 2 dargestellt.

		Jährlicher Stromverbrauch		
		69 TWh „Low“	86 TWh „Medium“	137 TWh „High“
Jährliche Wasserkraft- erzeugung	41 TWh „Bestand“	Szenario LB	Szenario MB	Szenario HB
	51 TWh „Zubau“	Szenario LZ	Szenario MZ	Szenario HZ

**Abbildung 2:** Szenarienübersicht

Die grün hinterlegten Szenarien sind mit den verfügbaren Flächenpotenzialen von Windkraft und Photovoltaik realisierbar. Bei den gelb und rot hinterlegten Szenarien reicht die verfügbare Potenzialfläche nicht aus, um eine energetische Deckung der Last zu erzielen. Im ersten Fall (MB) ist eine Erhöhung der Potenzialfläche auf den Faktor 1,5 nötig. Bei den Szenarien HB und HZ wäre die 4,3 fache Potenzialfläche zur energetisch Deckung nötig. Dies stellt eine massive Potenzialüberschreitung dar. Somit sind diese Szenarien aus energetischer Sicht nicht umsetzbar.

### 3 Zeitreihen der elektrischen Erzeugung

In Kapitel 2 wurden die installierbaren Leistungen von Windkraft und Photovoltaik beschrieben. Weiters sind die Erzeugungspotenziale der Laufwasserkraft sowie der österreichische Stromverbrauch bestimmt worden. In diesem Kapitel wird nun die Umrechnung der Zeitreihen regenerativen Dargebote auf elektrische Leistungen beschrieben.

Im Bereich der Wasserkraft dient ein Niederschlags-Abfluss-Modell zur Bestimmung der Abflussdaten. Diese Zeitreihen wurden unter Berücksichtigung der installierten Leistungen je Bundesland so skaliert, dass die Jahresezeugung der Zeitreihe mit der tatsächlichen Erzeugung übereinstimmt.

Für Windkraft und Photovoltaik dienen die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit sowie Globalstrahlung zur Berechnung der elektrischen Einspeiseleistung. Die Umrechnung des Dargebots auf die elektrischen Leistungen ist in den Beiträgen [1] und [2] genauer beschrieben. Aus diesen Profilen der Stationserzeugung wurden durch Multiplikation mit der jeweils vorhandenen Potenzialfläche die absoluten Zeitreihen der Windkraft- und Photovoltaikerzeugung berechnet.

Der Zeitverlauf des elektrischen Verbrauchs beruht auf den täglichen Belastungsabläufen, welche durch die E-Control ermittelt werden. Die normierten regionalen Verbrauchsprofile wurden je nach Szenario mit dem jeweiligen Inlandsstromverbrauch multipliziert. Als Ergebnis steht der elektrische Verbrauch als Zeitreihe in absoluter Darstellung zur Verfügung.

Alle zuvor beschriebenen mehrjährigen Zeitreihen liegen im Stundenraster vor. Die Kennwerte der österreichweiten Erzeugung und des Verbrauchs sind in Tabelle 2 exemplarisch für das Szenario LB-3 dargestellt. Dieses geht vom Verbrauch aus dem Jahr 2008 aus. Neben der bestehenden Erzeugung aus Wasserkraft wird der restliche Verbrauch durch Windkraft und Photovoltaik gedeckt. Dabei werden der Reihe nach die Standorte entsprechend ihrer Volllaststundenzahl ausgebaut. [3]

**Tabelle 2:** Kenngrößen und Extremwerte von Szenario LB-3

		LWK_at	Wind_at	PV_at	Erzeugung_at	Last_at	Differenz_at
Szenario LB-3	Jahressumme [GWh/a]	30.968	6.252	21.137	58.358	68.646	-10.288
	Mittlere Leistung [GW]	3,53	0,71	2,41	6,66	7,83	- 1,17
	Maximale Leistung [GW]	5,84	4,33	15,39	22,57	11,11	15,07
	Minimale Leistung [GW]	1,18	0,00	0,00	1,31	4,52	- 9,33
	Installierte Leistung [GW]	5,84	4,34	21,85	32,03	11,11	
	Volllaststunden [h]	5.307	1.441	967	1.822	6.178	

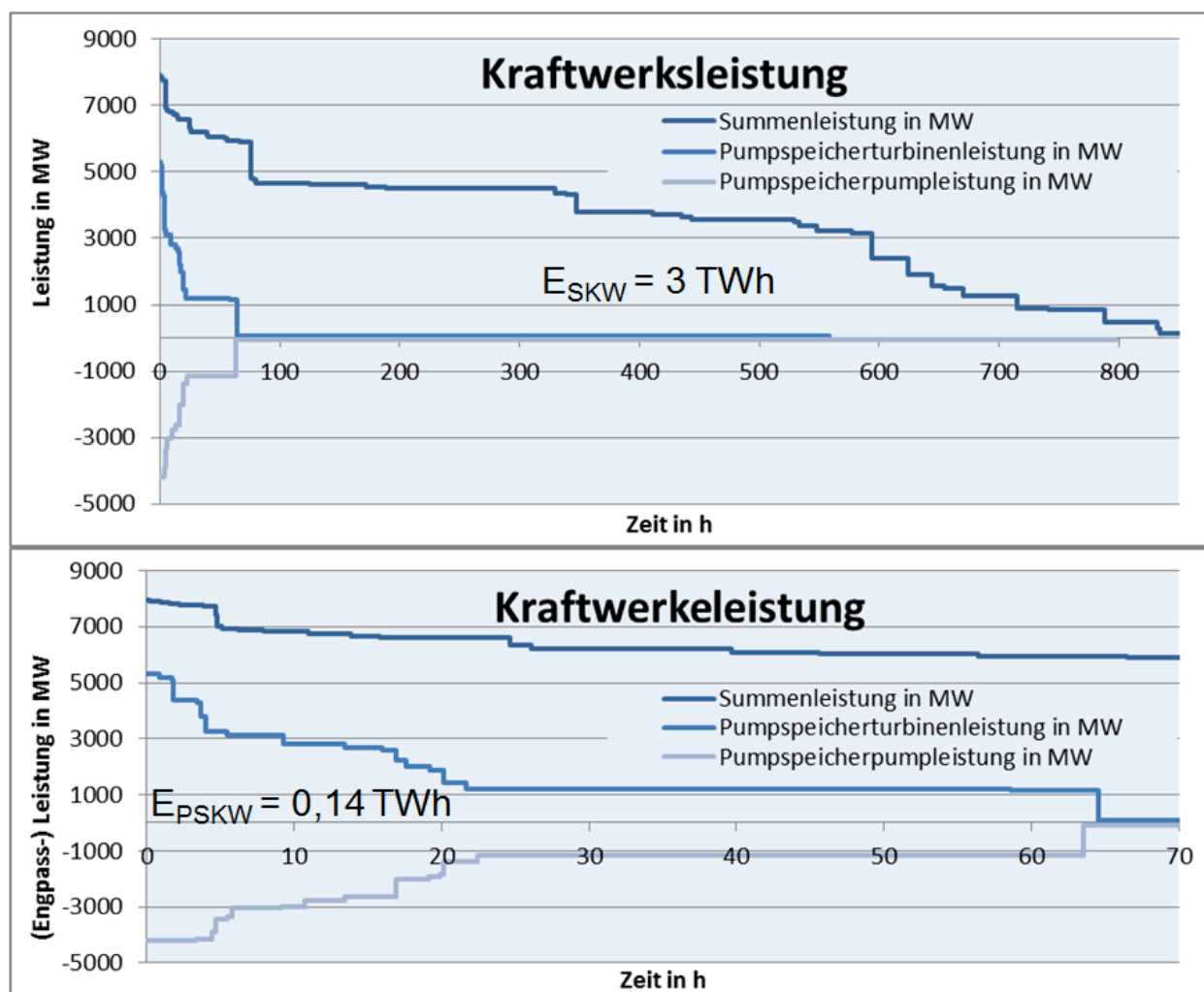
Die Spalte „Erzeugung\_at“ stellt die Summe der Erzeugungsformen Laufwasserkraft („LWK\_at“), Windkraft („Wind\_at“) und Photovoltaik („PV\_at“) dar. Die energetische Differenz zwischen Erzeugung und Last, welche 10288 GWh/a beträgt wird genau durch die Erzeugung aus Speicherkraftwerke gedeckt.

In Tabelle 2 ist ersichtlich, dass sowohl bei der Laufwasserkraft als auch bei der Windkraft die maximal auftretende Leistung gleich groß wie die installierte Leistung ist. Bei der Photovoltaik erreicht die österreichweite Erzeugung hingegen einen Spitzenwert von ca.

70 % der installierten Leistung. Gerade aufgrund der hohen Einspeiseleistung durch die Photovoltaik ist die maximale Gesamterzeugung mit ca. 22 GW doppelt so hoch wie der maximale Verbrauch mit ca. 11 GW. Die maximale positive Differenz (=Erzeugungsüberschuss) von 15 GW zeigt, dass die ungünstige Kombination von hoher Einspeisung und niedriger Last auftreten kann. Damit liegt der maximale Überschuss über dem maximalen Gesamtverbrauch!

#### 4 Speichererhebung

Die österreichischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke wurden hinsichtlich des vorhandenen Potenzials analysiert. Hierbei sind der geplante Ausbau bis 2020 und die technischen Restpotenziale ebenfalls berücksichtigt worden.



**Abbildung 3:** Dauerlinie der österreichischen (Pump-)Speicherkraftwerke bei einmaliger Entleerung/Befüllung (untere Abbildung ist Ausschnitt der oberen Abbildung)

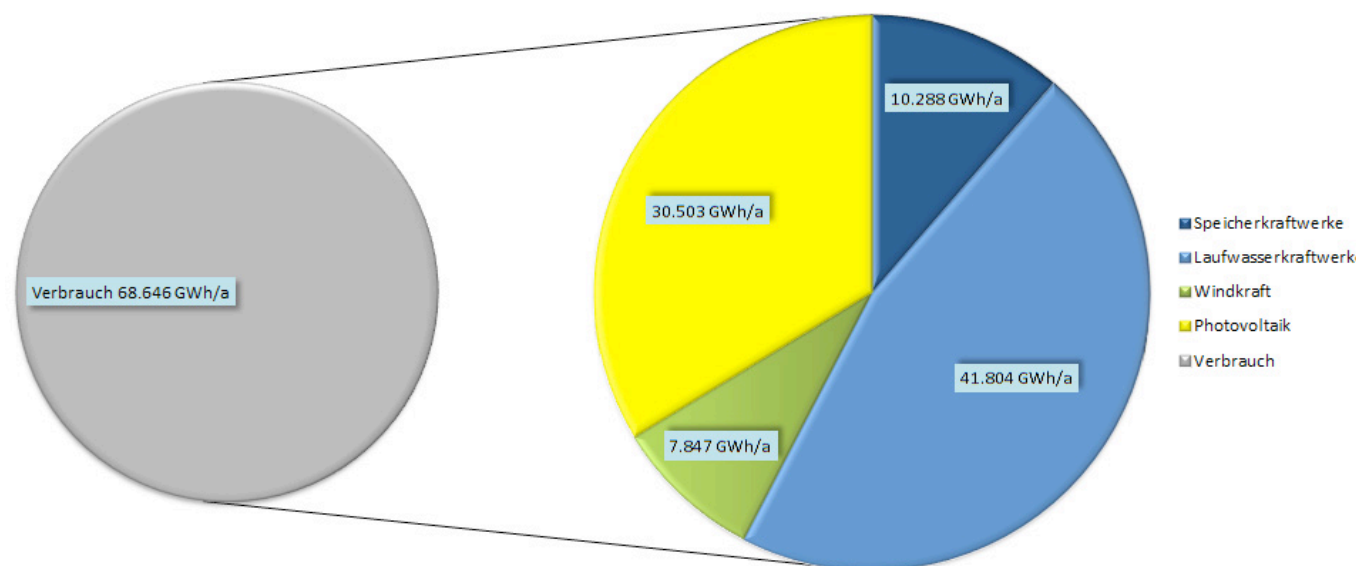
Für Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke wurden die benötigten Daten wie Energieinhalte der Becken, Engpassleistungen der Turbinen- und Pumpsätze sowie die Ausbaudurchflussmengen erhoben. Diese Daten wurden in einem Speichermodell berücksichtigt, um so die Dauerleistungskennlinie bei einmaliger Entleerung/Befüllung aller Speicher zu bestimmen.

Abbildung 3 zeigt den Extremfall eines einmaligen Entladevorgangs der vollen Becken aller österreichischen (Pump-)Speicherkraftwerke ohne natürlichen Zuflusses. Die Summenleistungskurve setzt sich dabei aus der Summe aus den theoretischen reversiblen und irreversiblen Anteil zusammen. Der reversible Anteil ist als Pumpspeicherturbinenleistung explizit angegeben. Der irreversible Anteil ist die Differenz zwischen Summenleistungs- und Pumpspeicherturbinenleistungskurve.

Die akkumulierte Erzeugung der Pumpspeicherturbinen bzw. die Energieaufnahme der Speicherpumpen entspricht der Fläche unter den Pumpspeicherleistungskurve und beträgt rund 143 GWh.

## 5 Ergebnisse

Die erhobenen mittleren jährlichen regenerativen Erzeugungspotenziale für Österreich sowie der Verbrauch (siehe Kapitel 2.5) sind in Abbildung 4 dargestellt. Somit ist eine energetische Deckung des österreichischen Inlandsstromverbrauchs aus dem Jahr 2008 mit 69 TWh möglich. Die energetische Deckung einer Verbrauchssteigerung um 25 % stellt bei der Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste durch Pumpspeicherung die Grenze der energetischen Deckung des Verbrauchs dar.



**Abbildung 4:** Verbrauch und Erzeugung im Vergleich, Szenario LZ-0

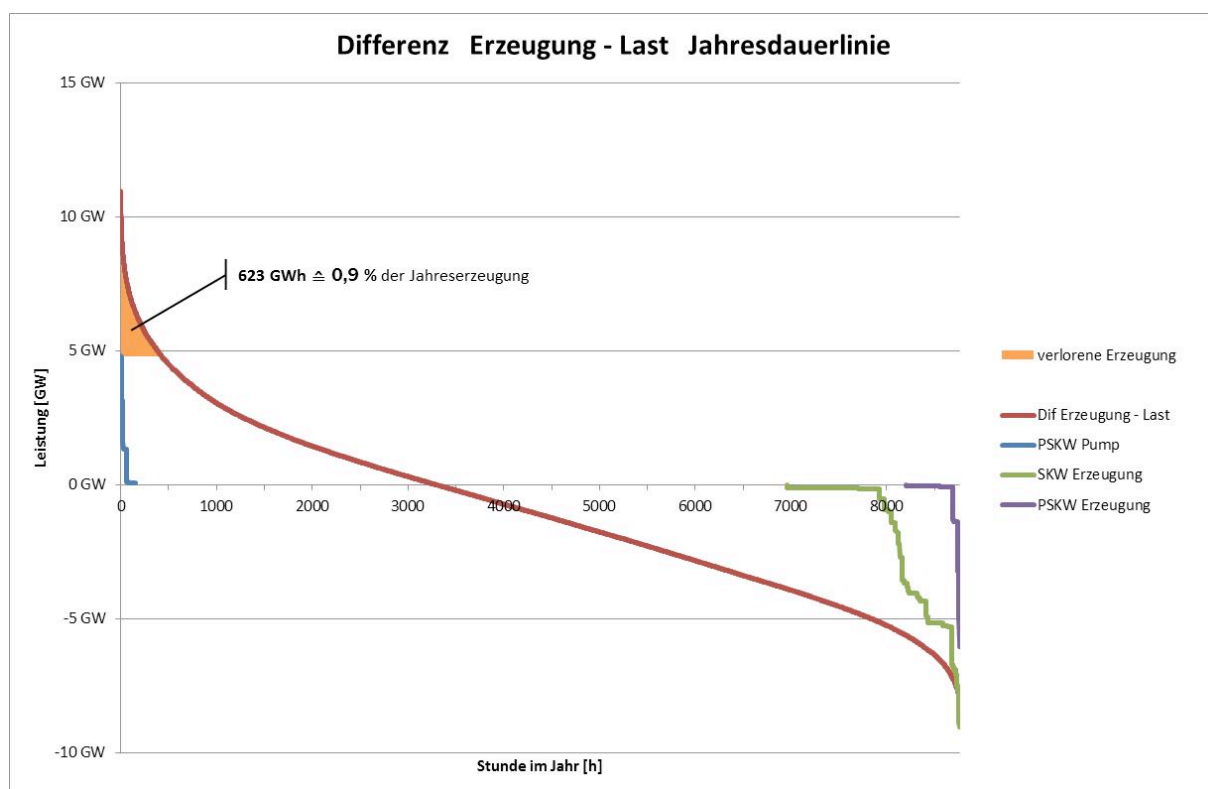
Ausgehend von den in Kapitel 2.5 beschriebenen Szenarien werden im Folgenden die beiden Szenarien LZ-1 und MZ-1 dargestellt. Beide Szenarien beschreiben die exakte energetische Deckung des Verbrauchs durch regenerative Erzeugungseinheiten. Es wurde jeweils der Zubau der Laufwasserkraft angenommen. Die beiden Varianten unterscheiden sich im Verbrauch. Während bei der Variante LZ-1 von einem gleichbleibenden Verbrauch ausgegangen wird, ist dieser bei MZ-1 um 25 % erhöht.

In Abbildung 5 ist die Jahresdauerlinie der Differenz aus dargebotsabhängiger Erzeugung und Verbrauch dargestellt. Positive Werte bedeuten dabei einen Erzeugungsüberschuss.



Energetisch sind die beiden Flächen unter der Kurve vor und nach dem Nulldurchgang nicht gleich. Dies liegt daran, dass die Erzeugung aus dem Regelarbeitsvermögen der Speicherkraftwerke mit 10.288 GWh/a hier noch nicht eingerechnet ist.

Neben der Jahresdauerlinie der Differenz aus Erzeugung und Last sind in Abbildung 5 auch die Leistungs-Zeit-Kennlinien der Pumpspeicherkraftwerke (im Pump- und Turbinenbetrieb) sowie der Speicherkraftwerke dargestellt. Die Bestimmung dieser Kennlinien ist in Kapitel 4 beschrieben. Auf der Erzeugungsüberschussseite ist die Dauerlinie der Pumpspeicherung (blaue Kennlinie) dargestellt. Dies entspricht dem Pumpvermögen aller österreichischen Pumpspeicherkraftwerke bei vollen Unterseen und leeren Oberseen. Zum Zeitpunkt  $t=0$  ist die maximale Pumpleistung von 4,79 GW erkennbar. Allerdings steht diese Leistung nicht dauerhaft zur Verfügung. Durch das Wegfallen jener Kraftwerke an denen die Oberseen gefüllt sind bzw. die Unterseen entleert werden, verringert sich die maximal mögliche Pumpleistung auf die in Betrieb befindlichen Pumpspeicherkraftwerken. Im Bereich des Erzeugungsdefizits sind die Kurven der Speicherkraftwerke (grün) und der Pumpspeicherkraftwerke (violett) im Turbinenbetrieb eingezeichnet. Der Verlauf der Pumpspeicherkraftwerke stellt dabei nur den Anteil der Speicherkraftwerke dar, welcher wieder reversibel hochgepumpt werden können. Die Kennlinie der Speicherkraftwerke (grün) ist somit die Summe aus reversiblen und nichtreversiblen Anteil.



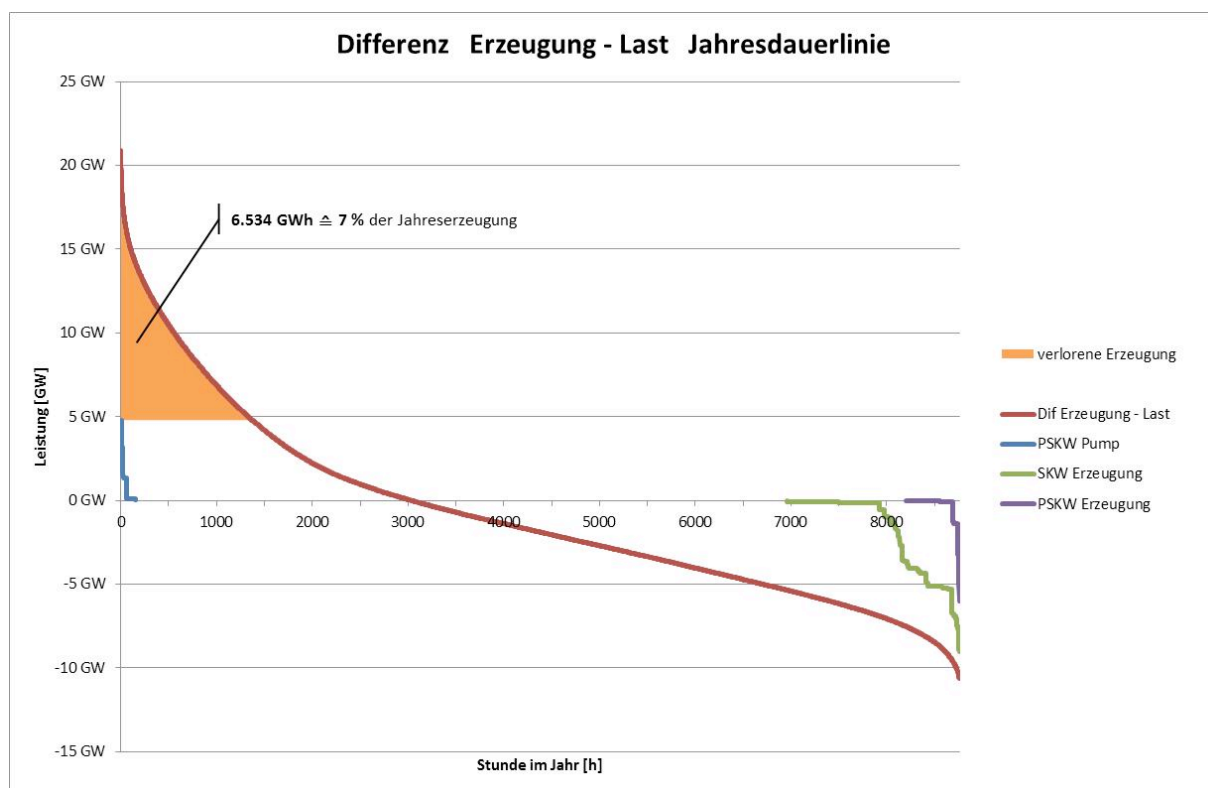
**Abbildung 5:** Szenario LZ-1 - Jahresdauerlinie der Differenz aus dargebotsabhängiger Erzeugung mit dem Verbrauch, sowie die Leistungs-Zeit Kennlinien von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken

Die Dauerlinie der Differenz in Abbildung 5 zeigt bei der Stunde 8760 einen Wert von  $-8,6 \text{ GW}$ . Diese Erzeugungsdifferenzen kommen typischerweise in jenen Situationen zustande, in denen weder eine Erzeugung aus Windkraft noch aus Photovoltaik vorliegt. In

der betrachteten 15-jährigen Periode tritt diese Situation auch in Kombination mit einem Lastwert im Bereich der Spitzenlast auf. Somit wird diese nur durch die Erzeugung aus Laufwasserkraft verringert. Die Dauerlinie der Speicherkraftwerke zeigt, dass diese von der Turbinenleistung her in der Lage sind, das maximal auftretende Erzeugungsdefizit zu decken. Die Dauerlinie zeigt jedoch, dass diese maximale Leistung nur für eine verhältnismäßig kurze Zeit bereitgestellt werden kann. Es wird hier von vollständig gefüllten Oberseen und dem maximalen Speichervermögen der österreichischen Speicherkraftwerke ausgegangen.

Im Bereich des Erzeugungsüberschuss zeigt sich bei der Stunde  $t=0$  ein Überschuss von 11GW. Damit ist die überschüssige Erzeugung nochmals genauso groß, wie die auftretende maximale Last, welche ebenfalls 11 GW beträgt. Abbildung 5 zeigt, dass diese Leistung von den Pumpspeicherkraftwerken nicht aufgenommen werden kann. Deren Spitzenleistung beträgt in Summe 4,8 GW. Der orange Bereich beschreibt jene Energie welche aufgrund der zu hohen überschüssigen Einspeiseleistung nicht von den Pumpspeicherkraftwerken aufgenommen werden kann. Dies beschreibt den „best case“, da hier angenommen wird, dass die für all jene Zeitpunkte jeweils die maximale Pumpleistung zur Verfügung steht. Die Verluste betragen dann 623 GWh, was rund 0,9 % der Jahreserzeugung entspricht.

In Abbildung 6 ist die Situation für eine 25 %-ige Steigerung des Verbrauchs dargestellt. Die überschüssig eingespeist Leistung ist nun mit 20 GW ca. doppelt so hoch wie zuvor. Dies ist vor allem über den gestiegenen Anteil der Photovoltaik Einspeisung begründet.



**Abbildung 6:** Szenario MZ-1 - Jahresdauerlinie der Differenz aus dargebotsabhängiger Erzeugung mit dem Verbrauch, sowie die Leistungs-Zeit Kennlinien von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken

Die Verbrauchssteigerung um 25 % bewirkt einen Anstieg der verlorengegangenen Erzeugung von 623 GWh auf 6.534 GWh um 1.000 %!

In Abbildung 5 und Abbildung 6 ist zu erkennen, dass das Speichervermögen der Pumpspeicherung mit 0,14 TWh deutlich geringer ist als der gesamte Überschuss von 8 TWh (Szenario LZ-1) bzw. 16 TWh (Szenario MZ-1). Somit kann die Pumpspeicherung für kurzfristige Ausgleichsvorgänge nicht jedoch für die Langzeitspeicherung verwendet werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Wie in Kapitel 5 dargestellt, ist die Verbrauchsentwicklung der entscheidende Faktor für eine (weitestgehend) regenerative Energieversorgung im Bereich der Elektrizität. Aus energetischer Sicht ist eine Vollversorgung bis zu einem Verbrauchsanstieg von 25 % gegenüber 2008 möglich.

In Bezug auf die entstehenden Einspeiseleistungen stellt die Wasserkraft die beste Erzeugungsform dar. Sie liefert die höchsten Volllaststunden der drei betrachteten Erzeugungsformen. Somit weist die Laufwasserkraft die geringsten Erzeugungsspitzen auf. Gleichzeitig sinkt die Einspeiseleistung im betrachteten 15-jährigen Zeitraum nie unter 30 % der installierten Leistung. Die Erzeugungsformen Windkraft und Photovoltaik hingegen weisen einen ungleichmäßigeren Einspeiseverhalten auf. Dies spiegelt sich in deutlich ausgeprägten Einspeisespitzen wider.

Die Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs stellt einen wesentlichen Einflussfaktor dar. Da das Ausbaupotenzial der Laufwasserkraft limitiert ist, kann ein Verbrauchsanstieg nur durch den vermehrten Einsatz der volatilen Einspeiseformen Windkraft und Photovoltaik gedeckt werden. Somit wird durch einen Lastanstieg von 25 % die maximale überschüssige Einspeiseleistung verdoppelt.

Das Speichervermögen der Pumpspeicherung ist bedeutend geringer als die Energieinhalte der auftretenden Überschüsse bzw. Erzeugungsdefizite. Somit eignet sich die Pumpspeicherung unter den hier betrachteten Rahmenbedingungen nur für kurzfristige Ausgleichsvorgänge, jedoch nicht zur langfristigen Energiespeicherung.

## 7 Literatur

- [1] Groß, Christoph: Photovoltaik-Erzeugung für eine regenerative Vollversorgung Österreichs, EnInnov 2010, Graz
- [2] Boxleitner, Martin: Super-4-Micro-Grid und das Österreichische Windpotenzial, EnInnov 2010, Graz
- [3] Groß, Christoph: Jährliche Erzeugungsschwankungen regenerativer Einspeiser, IEWT 2011, Wien
- [4] Boxleitner, Martin: Optimaler Erzeugungsmix für 100 Prozent regenerativen Strom in Österreich, IEWT 2011, Wien
- [5] Chochole, Michael: Dimensionierung eines Super-Grids für eine Vollversorgung Österreichs mit regenerativem Strom, EnInnov 2012, Graz

- [6] Boxleitner, Martin: Speicherbedarf für eine Vollversorgung Österreichs mit regenerativem Strom, EnInnov 2012, Graz
- [7] E-Control (Hrsg.): Statistikbroschüre 2009. Rudolfsplatz 13a, A-1010 Wien: Energie-Control GmbH, 2010.
- [8] Haas, Reinhard: Photovoltaik in Gebäuden, IEA Task 7. Wien, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2002.
- [9] Fechner, Hubert: Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich. Wien, BMVIT, 2007.
- [10] Fechner, Hubert: Gebäudeintegrierte Photovoltaik Teil 2. s.l., Österreichischer Klima- und Energiefonds, 2009.
- [11] Kaltschmitt, Martin: Regenerative Energien in Österreich. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009.
- [12] Wilk, Heinrich: 1 MW Photovoltaikkraftwerk Oberösterreich. TU Graz, 11. Symposium Energieinnovation, 2010.

Das Projekt „Super-4-Micro-Grid“ wird aus den Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

