

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Bauhofer, Peter; Zoglauer, Maichael**

## **Ausbau der Speicherwasserkraft als Voraussetzung für die Integration hoher Anteile hochvolatiler erneuerbarer Erzeugung**

VAW Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108413>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bauhofer, Peter; Zoglauer, Maichael (2021): Ausbau der Speicherwasserkraft als Voraussetzung für die Integration hoher Anteile hochvolatiler erneuerbarer Erzeugung. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 1. VAW Mitteilungen 262. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 19-28.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: CC BY 4.0



# Ausbau der Speicherwasserkraft als Voraussetzung für die Integration hoher Anteile hochvolatiler erneuerbarer Erzeugung

*Increasing the storage hydropower capacity to integrate a higher share of intermittent renewables*

**Peter Bauhofer, Michael Zoglauer**

## Kurzfassung

Mit dem Nationalen Energie und Klimapaket setzt sich Österreich zum Ziel, bis 2030 bilanziell ausgehend von heute ca. 74 % eine zu 100 % auf erneuerbaren heimischen Energiequellen beruhende Stromversorgung aufzubauen. Wasserkraft und die volatilen Quellen Windkraft und solarer Photovoltaik (PV) werden die zentrale Rolle spielen.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Entwicklung der Kenngrößen der Residuallast Österreichs (Last des öffentlichen Netzes abzüglich der Erzeugung aus Photovoltaik, Wind- und Laufwasserkraft) zu erfassen, um eine Abschätzung für den Flexibilisierungsbedarf Österreichs zu geben. Dafür werden stündliche Zeitreihen von Last und Erzeugung des Jahres 2016 für ausgewählte Stützjahre bis 2050 skaliert.

Die Residuallast und damit der Flexibilisierungsbedarf nehmen für folgende Kenngrößen auf allen Zeitebenen und in beiden Energieflussrichtungen überproportional zu: Leistungsspitzen, Energie, Gradienten (Rampen) und Lastwechsel. Es zeichnet sich ab, dass schon ab etwa 2025 die Leistungsgrenze des vorhandenen steuerbaren Kraftwerksparks erreicht wird. Es wird erwartet, dass bis 2030 mindestens ca. 7 TWh/a zusätzlich mittels Speicherwasserkraft- und Pumpspeichieranlagen vom Sommer in den Winter umzulagern sind. Für die Systemstabilität und Versorgungssicherheit ist daher der rasche Ausbau kalkulierbarer, effizienter Einheiten in Form großer Wasserkraftspeicher und Pumpspeicher (unter Nutzung natürlicher Zuflüsse) notwendig. Diese werden durch steuerbare thermische Einheiten und längerfristig auch durch *Power-to-Gas* (P2G)-Anlagen unterstützt. Flächendeckende Korrelationen der Erzeugung aus Windkraft und PV bis hin zur so genannten Dunkelflaute lassen die Nutzung von *Cross-Border-Flexibilität* nur in moderatem Maß als ratsam erscheinen.

Die Kernaussagen sind für Elektrizitätsversorgungssysteme mit einem hohen Erneuerbaren-Anteil in erster Näherung verallgemeinerbar. Vertiefende Analysen zur Bestimmung der Bandbreiten werden für weitere Jahre mit anderem Wettergeschehen empfohlen.

## **Abstract**

Today, renewable energies contribute to 74% of Austria's electricity production. The Austrian energy policy aims at increasing this share to 100% on a yearly balance until 2030, mainly based on hydropower and highly intermittent wind power as well as solar photovoltaics (PV).

To estimate the need for flexibility, the evolution of Austria's residual load, i.e. the load of the public grid minus the generation from photovoltaics, wind and run-of-river hydropower, are analyzed with an hourly resolution. Thereby, the key parameters such as peaks, ramps, duration and energy content of residual load blocks for both energy flow directions are investigated with a focus on 2030 and a prospect to 2050.

The residual load and thus the need for flexibility increase disproportionately for the following parameters at all time frames and in both energy flow directions: power peaks, energy, gradients (ramps) and load changes. It is anticipated that Austria's flexible units will not be able to meet its flexibility needs already after 2025. It is expected that by 2030 at least an additional 7 TWh/a will have to be transferred from summer to winter by means of storage hydropower and pumped storage plants. For system stability and security of supply, the rapid expansion of controllable, efficient units in the form of large hydropower storage and pumped storage also using natural inflows is therefore necessary. These are supported by dispatchable thermal units and, in the longer term, also by power-to-gas (P2G) installations. Possible wide-area correlations of wind and solar radiation PV may lead to system-wide imbalances. As occasional very low generations from wind and PV in large regions cannot be excluded, it is advisable to rely only to a limited extent on cross-border flexibility.

The core statements can be generalized for electricity supply systems with a high share of intermittent renewables. Additional analyses to determine the bandwidths are recommended for further years with different weather patterns.

## **1 Residuallastanalyse**

Die Energiewende wird zunehmend von folgenden Knappheitsgütern gekennzeichnet sein: Akzeptanz, Leistbarkeit sowie jederzeitige Verfügbarkeit der Grundversorgung für das Individuum und die Wirtschaft. Die Systemstabilität und

Versorgungssicherheit sind daher notwendige Voraussetzungen, dass die Energiewende weiterhin mitgetragen wird. Die bisherige Versorgungssicherheit war durch die Reserven der Energieinfrastruktur gewährleistet. Diese Reserven sind so gut wie aufgebraucht. Der Kohleausstieg in Deutschland beschleunigt diesen Prozess. Das Stromsystem ist, verglichen mit anderen leitungsgebundenen Energiesystemen (Gas und Öl), äußerst sensibel. Sein stabiler Betrieb verlangt den jederzeitigen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch (Last). Die Mechanismen zum Erhalt dieses Gleichgewichts setzen in allen Zeitbereichen an, beginnend im subtransienten Spektrum (Momentanreserve aus der Trägheit – Inertia - rotierender Maschinen) bis hin zur Energieverlagerung über mehrere Monate (saisonale Flexibilität).

### 1.1 Systemflexibilität

Die Fähigkeit eines Systems auf Änderungen zu reagieren, wird als Systemflexibilität bezeichnet (ENTSO-E 2015). Die bloße Sicherstellung einer ausgeglichenen Jahresenergiebilanz, wie im energiepolitischen Diskurs oft dargestellt, genügt hingegen keineswegs. Die Residuallast *PRL* wird auf Systemebene in stündlicher Auflösung als die Leistungsdifferenz zwischen der Last des öffentlichen Netzes (*LastÖN*) und der dargebotsabhängigen Einspeisung (*RESEvol(t)*) aus erneuerbaren Quellen in das öffentliche Netz bestimmt:

$$PRL(t) = LastÖN(t) - \sum RESEvol(t) \quad [1]$$

Weil auch die saisonalen Effekte erfasst werden sollen, wird die Erzeugung aus Laufwasserkraft mitberücksichtigt. Die Residuallast ist ein Maß dafür, in welchem Ausmaß innerhalb der jeweiligen Stunde zur Aufrechterhaltung der Bilanz mit Hilfe von Flexibilisierungsmaßnahmen Leistung aus dem System entnommen oder zugeführt werden muss. Im ersteren Fall mit negativer Residuallast würde temporärer Erzeugungsüberschuss bestehen, im letzteren Fall mit positiver Residuallast würde zu wenig erzeugt. Die Technologiewahl und Dimensionierung der Flexibilisierungsoptionen wird künftig maßgeblich von den Kenngrößen der Residuallast jeweils in beiden Energieflussrichtungen beeinflusst. Dabei werden betrachtet: Leistungsspitze (*PRLmax*), Stundengradient/-Rampe ( $\Delta PRL$ ), Energieinhalt je Leistungsblock (*ERL*) sowie die Anzahl der Vorzeichenwechsel.

Die Ausbauziele für die hochvolatile Erzeugung aus Windkraft und PV werden infolge des dafür erforderlichen starken Zuwachses an installierter Anlagenleistung (Wind: + ca. 4.5 GW, PV: + ca. 10.5 GW) das österreichische Stromsystem spätestens ab 2025 einer enormen Belastung aussetzen, die relativ gesehen jene in Deutschland übersteigt. Dies führt unter anderem im Zeitraum Mai bis September trotz dezentraler Dämpfungsmaßnahmen zur wiederholten Umkehr

der Residuallast (Erzeugungsüberschüsse) in allen Zeitbereichen samt ausgeprägten Leistungsspitzen und Rampen. Der Sommerüberschuss ist dem Stromsystem im Winter in geeigneter Form möglichst verlustarm wieder zuzuführen (Langfristflexibilisierung).

## 1.2 Kenngrößen der Residuallast

Im Folgenden werden für die Jahre 2016, 2020, 2030, 2040 und 2050 die Ergebnisse zu den Kenngrößen der Residuallast zusammengefasst. Die Darstellungen entsprechen, soweit nicht anders angeführt, dem koordinierten Ausbau von Laufwasserkraft, Windkraft und PV mit gleichbleibenden Erzeugungsanteilen (jeweils durchgezogene Linien). Zur Auslotung der Sensitivität sind überdies als strichlierte Linien hypothetische Ausbauszenarien nur auf Basis von Wind, oder nur PV oder nur in Kombination der beiden dargestellt. Eine übliche Kenngröße ist der *RES-Load-Penetration Index* (RES = Renewable Energy Sources)

$$RLPI = \max \left( \frac{P_{Wind(t)} + P_{PV(t)}}{Last_{\ddot{O}N(t)}} \right) \quad [2]$$

als Jahresmaximum des Verhältnisses zwischen der zeitgleichen Einspeiseleistung aus Windkraft plus PV und der Last des öffentlichen Netzes (ENTSO-E 2015). Der *RLPI* gibt also Auskunft über den maximalen stündlichen Deckungsgrad der Last mit Hilfe der volatilen Einspeisung innerhalb eines Jahres. Bereits in 2025 liegt dieser Index für Österreich in der Größenordnung von 130 %, steigt rasch an und erreicht bis 2050 Werte bis 260 %.

Stromsysteme mit hohen volatilen Erzeugungsanteilen benötigen nicht nur Einrichtungen zur Flexibilisierung mit hoher Leistung und zum Teil hoher Energiespeicherkapazität jeweils in beiden Energierichtungen. Die künftig zu erwartende hohe Dynamik verlangt von ihnen auch eine ausgeprägte Rampungsfähigkeit. Das Einspeisegradienten-Last-Verhältnisses ist neben dem Residuallastgradienten (Ramping) ein Indiz dafür, wie schnell die Flexibilisierungseinrichtungen ihre Einspeisung bzw. Rücknahme einsteuern müssen, um jederzeit das System auszubalanzieren. Diese Notwendigkeit ist jahresdurchgängig gegeben. In beiden Energieflussrichtungen sind jahresdurchgängig bereits bis 2030 Werte über 20 %, in Einzelfällen bis zu 40 % möglich. Das heißt, von einer Stunde zur nächsten kann sich die Produktion aus Wind und Sonne so stark ändern, dass dies bis zu 40% des Verbrauchs ausmacht.

Unter den gegebenen Annahmen wachsen die Kenngrößen sowohl der positiven wie auch der negativen Residuallast zum Teil stark an. Die negative Residuallast nimmt sowohl betreffend Energie als auch für Leistungsspitzen wesentlich stärker zu als die positive.

Der kumulierte Energieinhalt aller Stunden mit negativer Residuallast eines Jahres wird sich von derzeit ca. -0.4 TWh/a bereits bis 2025 auf mindestens -3 TWh/a und bis 2030 auf ca. -7 TWh/a erhöhen. Bis 2050 ist ein Wert bis -12 TWh/a (temporärer Energieüberschuss aus Photovoltaik und Wind) bei einem angenommenen Gesamtstromverbrauch von ca. 110 TWh/a nicht ausgeschlossen.

Die minimale negative Residuallastspitze  $PRL_{min}$  wird sich von heute ca. -3 GW bereits bis 2025 auf ca. -6 GW verdoppeln und bis 2030 etwa -9 GW erreichen (Abb. 1 und 2). Bis 2050 sind bereits bei einem ausgewogenen Ausbau -17 GW zu erwarten; bei einer Übergewichtung von Windkraft und/oder PV wesentlich mehr. Bereits die Kombination von Wind und PV führt in beiden Energieflussrichtungen zur deutlichen Dämpfung der Entwicklung. Dieser Effekt wird über die Harmonisierung mit dem Laufwasserkraftausbau weiter verstärkt.

Der Energieinhalt aller Stunden mit positiver Residuallast (Erzeugungsdefizit momentan-dargebotsabhängiger Quellen) beträgt in 2030 ca. 20 TWh und erreicht bis 2050 ca. 30 TWh. Die Spitzenleistung  $PRL_{max}$  bleibt bis 2030 mit ca. 10 GW etwa unverändert und wächst bis 2050 auf etwa 15 GW (Abb. 1, 2).

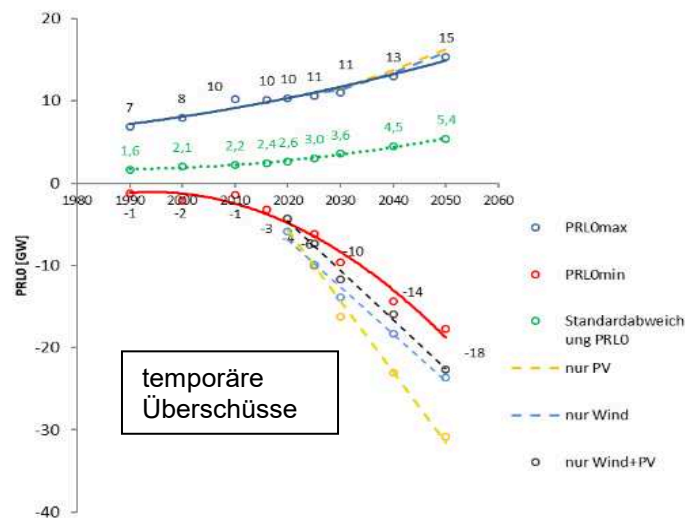


Abb. 1: Entwicklung der Residuallastspitzen PRL [GW] samst Standardabweichung 1990 bis 2050.

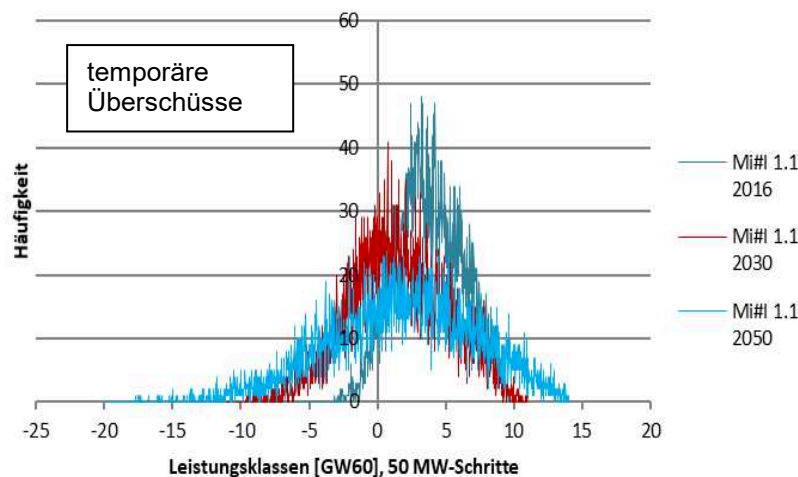


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung für PRL [GW] für die Jahre 2016, 2030 und 2050.

Die Blockdauer der negativen Residuallast mit maximalem Energieinhalt wächst von ca. 16 h (-0.02 TWh) auf 117 h (-0.6 TWh) bereits in 2030. Deren Pendant, die positive Residuallast, fällt von ca. 2460 h (12 TWh) auf 430 h (3 TWh) in 2030. Die Anzahl der Blöcke mit positiver bzw. negativer Residuallast nimmt ausgehend von jeweils ca. 110 Ereignissen pro Jahr in 2016 auf jeweils ca. 340 Ereignisse pro Jahr in 2030 zu und erfährt damit etwa eine Verdreifachung.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Stundengradienten der Residuallast  $\Delta PRL$  (Abb. 3 und 4). Der Glättungseffekt der Laufwasserkraft auf den Residuallastgradienten ist noch ausgeprägter als für die Residuallastspitzen. In beiden Energieflussrichtungen nehmen die Maximalwerte von heute ca. +/- 2 GW/h auf ca. +/- 4 GW/h in 2030 bzw. +/- 6 GW/h in 2050 stark zu. Die Häufigkeit kleiner Gradienten nimmt künftig ab, während sie in allen höheren Klassen für beide Richtungen zunimmt. Die Entwicklung der Leistungswerte und Gradienten der Residuallast erhöhen den Bedarf an Kurzfristflexibilität beträchtlich.

Im Fall des Ausbaus nur jeweils einer volatilen Erzeugungsart bzw. der Kombination ergibt sich ein zu den Leistungsspitzen identes Bild. Traten in 2016 nur minimale Überschüsse in den Sommermonaten auf, erreichen diese in 2025 bereits 2.8 TWh (11% der dargebotsabhängigen Sommererzeugung) und liegen in 2030 bei etwa 6 TWh (18 % der dargebotsabhängigen Sommererzeugung bzw. ca. 9 % der dargebotsabhängigen Jahreserzeugung) mehr als doppelt so hoch.

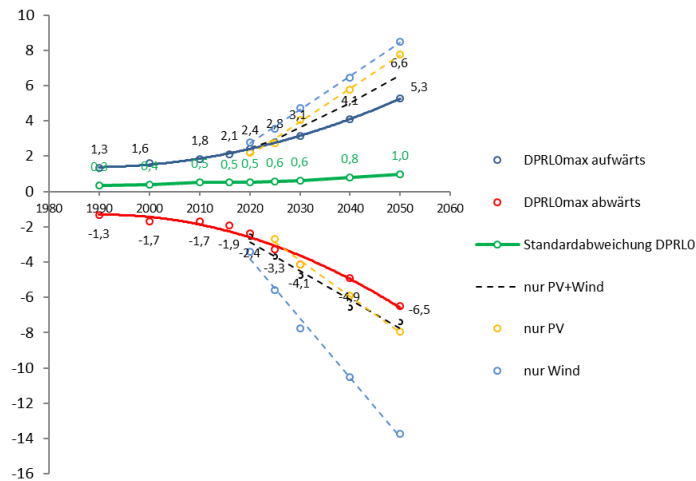


Abb. 3: Stundengradient DPRL [GW] samt Standardabweichung 1990 bis 2050.

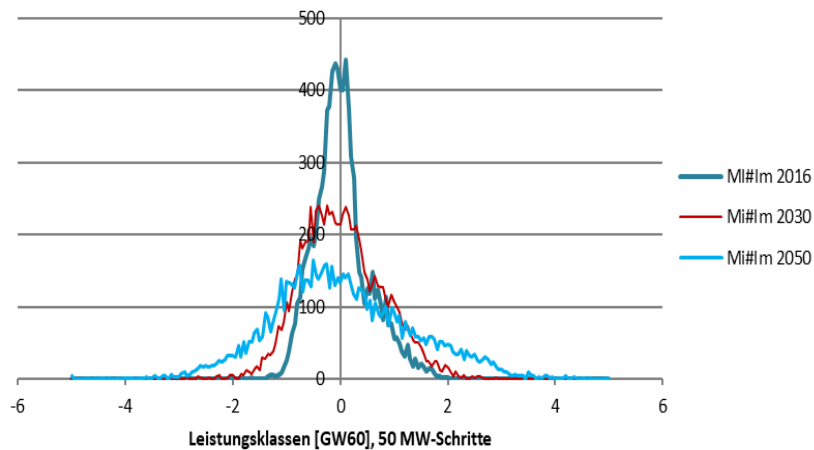


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung des Stundengradienten DPRL [GW] der Residuallast für die Jahre 2016, 2030, 2050.

Die Frage der saisonalen Flexibilität wird daher für Österreich bereits Mitte der 2020er Jahre von erhöhter Relevanz. Hand in Hand mit der Zunahme der Residuallastspitzen erfährt auch das Jahresmaximum der Tageshübe

$$\vartheta = \max(PRL_{max}(d) - PRL_{min}(d)) \quad [3]$$

einen überproportionalen Zuwachs. Dieses erreicht bereits in 2025 mindestens 9 GW und steigt bis 2050 auf mindestens 20 GW. Ein forciertes PV- und/oder Windkraftausbau führen zu beträchtlichen Erhöhungen dieser Werte.



## 2 Vorteile von (Pump-)Speicherwasserkraft

Für den Ausgleich in beide Energieflussrichtungen sind hoch verfügbare, energetisch wie wirtschaftlich hoch effiziente, planbare und mit „steilen Rampen“ betreibbare Technologien gefragt. Die Flexibilisierungsoptionen richten sich nach den technisch-ökonomischen Möglichkeiten ihrer Anwendung (Speicher- und Pumpspeichersysteme, thermische Erzeugung, Sektorkopplungstechnologien bis hin zu dezentralen Lösungen, wie etwa Laststeuerung und Batteriespeichern) sowie der individuellen energiewirtschaftlichen Zielsetzungen der Marktteilnehmer.

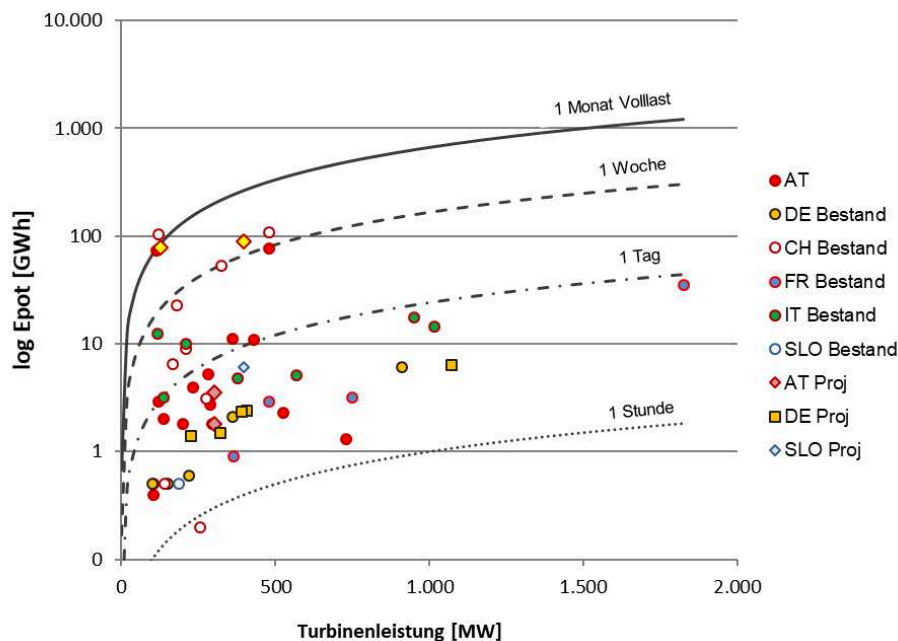


Abb. 5: Speicherkapazität ( $E_{pot}$ ), Leistungen und Laufreserven von Pumpspeichieranlagen in den Alpen (Quelle: AGAW, TIWAG 2020).

Die Wasserkraft erfüllt kalkulierbar und über den Lebenszyklus weitgehend frei von Treibhausgasemissionen diese Anforderungen im Spitzenfeld und bewirkt überdies beträchtliche Kosten- und  $CO_2$ -Einsparungen für den Betrieb thermischer Anlagen, weil diese effizienter betrieben werden können. Als Alleinstellungsmerkmal können Wasserkraftspeicher und Pumpspeicher mit natürlichem Zufluss bereits die Primärenergie des Wassers zum Teil in beträchtlichem Ausmaß (s. Abb. 5) nahezu verlustfrei speichern und Strom erst dann erzeugen, wenn er benötigt wird. Dies gelingt weder für die im Wind gespeicherte Energie, noch für die solare Strahlung.

In Europa stellt die Wasserkraft Flexibilität oft aus Kraftwerksgruppen zur Verfügung. Diese können aus einer betrieblich optimierten Kombination von Speicher-

und Pumpspeicherkraftwerken, gegebenenfalls auch mit nachgereihten Kaskaden bestehen (s. Abb. 6). Zukunftsorientierte Anlagen-dimensionierungen sind dabei nach Möglichkeit auf eine Saison- oder gar Jahresflexibilisierung ausgerichtet.

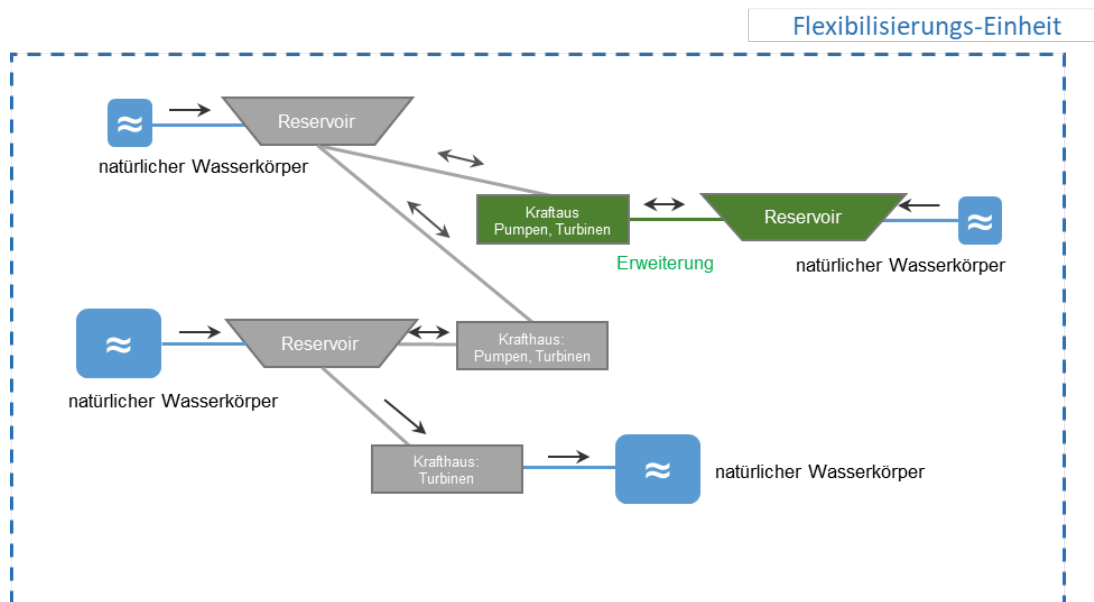


Abb. 6: Effiziente Flexibilisierung mit Kraftwerksgruppen (Quelle: TIWAG 2021).

Weiter sind große, primärregelfähige Laufkraftwerke, Wasserkraftspeicher und Pumpspeicher wichtig, um krisenhafte Netzzustände zu bewältigen. Damit kann ein Netzerfall eingedämmt oder gar vermieden werden und im Fall eines Blackouts die Versorgungsunterbrechung kurz sowie der volkswirtschaftliche Schaden geringgehalten werden. Diese Bedeutung der Wasserkraft wurde einmal mehr im Zuge des Großstörungsereignisses vom 8. Januar 2021 aufgezeigt, als im zentraleuropäischen Netzbereich hochflexible Einheiten der Großwasserkraft maßgeblich dazu beigetragen haben, dass der Netzerfall nicht weiter eskaliert ist.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die österreichischen Ziele zur Energiewende lassen bereits ab Mitte der 2020er-Jahre einen raschen Anstieg der Spitzenleistungen, Leistungsänderungen (Rampen) und Energieinhalte der Residuallast in beiden Energieflussrichtungen erwarten. Bereits mittelfristig wird die preiswerte und verlustarme Umlagerung von Strom vom Sommer in den Winter eine bedeutende Rolle spielen. Der Verzicht auf die Energieabnahme von unplanbaren Erzeugungsanlagen in Überschusszeiten („Abregelungen“) in großem Stil erscheinen nicht sinnvoll. Bis 2030 wird das österreichische Elektrizitätsversorgungssystem in Ergänzung zum bestehen-

den Wasserkraftspeicher- und Pumpspeicherpark weitere ca. 7 TWh an hoch zuverlässiger, flexibel abrufbarer Kapazität benötigen. Die installierten Leistungen bestehender flexibler Kraftwerksanlagen werden dem Bedarf nicht mehr genügen. Dem grenzüberschreitenden Flexibilitätsimport, der ein moderates Ausmaß übersteigt, ist angesichts signifikanter, flächendeckender Korrelationen der Erzeugung aus Windkraft und PV bis hin zum Phänomen der Dunkelflaute sowie der Folgen des anstehenden Kohleausstiegs mit Vorsicht zu begegnen. Die Wasserkraft erfüllt die gestellten Anforderungen auch zukünftig im Spitzenfeld der Optionen. Die zeitgerechte Nutzung des beträchtlichen Potenzials der Speicherwasserkraft- und Pumpspeichieranlagen aus Erweiterungen und Neubauten verlangt nach fairen Rahmenbedingungen für alle Energieumwandlungstechnologien sowie beschleunigte Verfahrensabwicklungen.

## Referenzen

- ENTSO-E (2015). Scenario Outlook & Adequacy Forecast. <https://docs.entsoe.eu>
- ENTSO-E (2018). Completing the Map 2018. System Needs Analysis. <https://docs.entsoe.eu>
- Pöyry (2018). Wasserkraftpotenzialstudie Österreich, Aktualisierung 2018. <https://oesterreichsenergie.at>
- SuREmMa (2017). Sustainable River Management –Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen. Technischer Bericht C. Die Rolle der Speicherwasserkraft im österreichischen und europäischen Stromsystem. <https://www.e3-consult.at>
- AGAW (2019). Wasserkraft & Flexibilität. <http://www.alpine-wasserkraft.com/>
- Bauhofer, P., Zoglauer, M. (2019). Pumped hydro storage as enabler for energy transition. Proc. Hydro Conference, Porto, Portugal, paper no. 15d.01.

## Adressen der Autoren

Dr. Peter Bauhofer (korrespondierender Autor)

Dipl. Ing. Michael Zoglauer

TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG

AT-6020 Innsbruck, Eduard Wallnöfer Platz 2

[peter.bauhofer@tiwag.at](mailto:peter.bauhofer@tiwag.at)

[michael.zoglauer@tiwag.at](mailto:michael.zoglauer@tiwag.at)