

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 2

Artikel: Pumpspeicher-Kraftwerke : Einsatz und Betriebsergebnisse

Autor: Wagner, Eberhard

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-901897>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Pumpspeicher-Kraftwerke

Einsatz und Betriebsergebnisse

Pumpspeicher-Kraftwerke sind neben Spitzenlast-Gasturbinen-Anlagen unverzichtbare Bestandteile eines effizienten und zuverlässigen Kraftwerkparkes der allgemeinen Stromversorgung. In Statistiken werden üblicherweise nur Daten veröffentlicht, aus denen der Einsatz der Kraftwerke unzulänglich zu erkennen ist. Insbesondere bezieht sich die dort ausgewiesene Ausnutzungsdauer der Kraftwerke nur auf die gelieferte Wirkarbeit mit relativ geringen Werten von etwa 1000 h/a. Die Inanspruchnahme dieser Kraftwerke durch den Pumpbetrieb, den Phasenschieber-Betrieb und andere bleiben unberücksichtigt. Diese Tatsachen waren Anlass, eine Analyse der Betriebsdaten durchzuführen.

■ Eberhard Wagner

Allgemeines

Pumpspeicher-Kraftwerke (PSW) sind neben Spitzenlast-Gasturbinen-Anlagen – dazu zählt auch das Luftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerk Huntorf (Niedersachsen) – unverzichtbare Bestandteile eines effizienten und zuverlässigen Kraftwerkparkes der allgemeinen (öf-

fentlichen) Elektrizitätsversorgung, aber auch des Stromnetzes der Bahnen zur Sicherstellung der Versorgung.

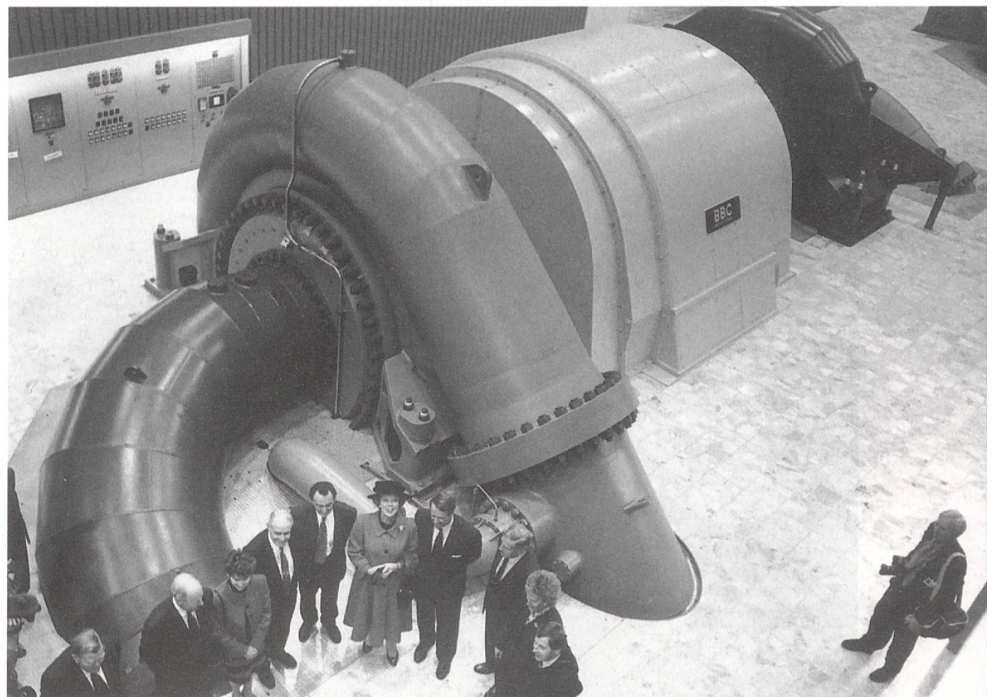
In den einschlägigen Statistiken [1] werden üblicherweise nur sehr allgemeine Daten veröffentlicht, aus denen der Umfang des Einsatzes der Kraftwerke nur unzulänglich zu erkennen ist. Insbesondere bezieht sich die ausgewiesene Ausnutzungsdauer [2] der Kraftwerke – im Sprachgebrauch «Vollaststunden» genannt – nur auf die gelieferte Wirkarbeit

Adresse des Autors

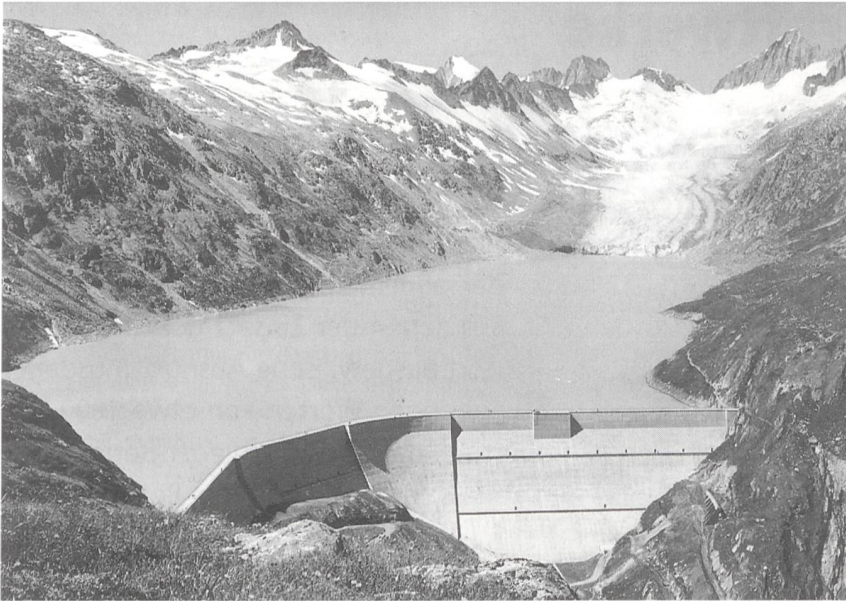
Dipl.-Ing. Eberhard Wagner
Hauptreferent
Vereinigung Deutscher
Elektrizitätswerke – VDEW – e.V.,
Stresemannallee 23
D-60596 Frankfurt am Main

Der Verfasser bedankt sich beim
VDEW-Arbeitsausschuss
«Wasserkraft – Anlagentechnik und Betrieb»
für Hinweise und Datenmaterial.

Photos: VSE



Maschinenhalle des Pumpspeicher-Kraftwerks Grimsel II (BE) anlässlich des Staatsbesuchs der niederländischen Königin Beatrix im Jahr 1993 (Bild H. Trachsel).



Stauanlage Oberaar des Pumpspeichersystems Grimsel (BE).

mit relativ geringen Werten von etwa 1000 h/a. Die Inanspruchnahme dieser Kraftwerke durch den Pumpbetrieb und den bedeutsamen sogenannten Phasenschieber-Betrieb (Blindarbeit) bleiben unberücksichtigt.

Die aus der genannten Ausnutzungsdauer von Fachfremden fälschlich abgeleitete geringe Nutzung einerseits und

der pauschal daraus abgeleiteten Kostenträchtigkeit der Anlagen andererseits sind Anlass gewesen, eine Analyse der Betriebsdaten durchzuführen und weitere Fakten über den Einsatz dieser Kraftwerke zusammenzustellen.

Vereinzelt wird argumentiert, dass Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) wegen ihres täglichen Leistungszyklusses



Pumpspeicheranlage Robiei (TI).

Netzbelastungsspitzen abdecken können und mit den Erzeugungskosten von Pumpspeicher-Kraftwerken gleichzusetzen sind. Diese Verknüpfung wird den Gegebenheiten nicht gerecht. Pumpspeicher-Kraftwerke haben Maschinensatzleistungen von bis zu etwa 250 MW; Photovoltaikanlagen erreichen bisher Einzelleistungen von etwa 1 MW. Die PV-Leistung ist nicht vorhersehbar, sie ist auch in ihrer Grösse nicht steuerbar; Leistungsspitzen bzw. grosse Leistungsgradienten der Netzlast können zu allen Tageszeiten eintreten, die Leistungs-Frequenz-Regelung sowie die Spannungshaltung und die Beeinflussung der Phasenlage zwischen Strom und Spannung (Phasenschieberbetrieb) sind nicht möglich.

Pumpspeicher-Kraftwerke sind die einzigen Kraftwerke, die vorteilhaft sehr kurzfristig elektrische Energie aus dem Netz bei Störungen aufnehmen können (Pumpbetrieb), um dadurch unmittelbar zur Frequenzhaltung beizutragen. Diese Einsatzmöglichkeit besteht dagegen bei Gasturbinen-Kraftwerken nicht.

Missverständnisse bestehen oft bei der Darstellung der Stromerzeugung aus Wasserkraft bezüglich ihres regenerativen Charakters und der Stromerzeugung aus gepumptem Wasser. Die Stromerzeugung aus gepumptem Wasser in PSW wird von VDEW als «nicht-regenerative Wasserkraft» beurteilt [3].

Grundsätzlich werden Pumpspeicher-Kraftwerke unterschieden in

- Anlagen mit natürlichem Zufluss (das Oberbecken wird durch ein Fließgewässer oder Wasserleitungen zusätzlich befüllt)
- Anlagen ohne natürlichen Zufluss (das Oberbecken wird ausschliesslich durch gepumptes Wasser befüllt).

Die Wasserverdunstung in den Ober- und Unterbecken wird während eines Jahres in etwa durch Regeneinträge ausgeglichen.

Einsatz und Aufgaben

Pumpspeicher-Kraftwerke bieten als einzige Energieanlagen die Möglichkeit, Elektrizität im Erzeugungsbereich im nennenswerten Umfang mit Hilfe potentieller Wasserenergie zu speichern. Wie keine andere Kraftwerksart stellen sie eine Leistungsreserve mit hoher Verfügbarkeit – bei sehr kurzen Abrufzeiten – dar und gestatten somit, erforderliche Spitzenbelastungen des Netzes zu decken und der Frequenzhaltung zu dienen.

Pumpspeicher-Kraftwerke sind für den sicheren Betrieb eines Versorgungsnetzes auch überregional unverzichtbar und erhöhen die Qualitätsmerkmale wie die Spannungs- und Frequenzstabilität in erheblichem Masse.

Die vielseitige Nutzungsmöglichkeit der Pumpspeicher-Kraftwerke zeigt sich im einzelnen:

Wälzbetrieb (Stromveredelung)

In Spitzenlastzeiten wird elektrische Energie aus Wasser gewonnen, das zu Schwachlastzeiten in das Oberbecken (Hochspeicher) gepumpt worden ist.

Reserve- und Störungsreserve-Bereitstellung

Pumpspeicher-Kraftwerke können innerhalb von etwa einer Minute vom Stillstand in den Generatorbetrieb gefahren werden – sogenannte Minutenreserve. Die Schnelligkeit der Energiedarbietung kann von keiner anderen Kraftwerksart erreicht werden. Beim Pumpspeicher-Kraftwerk Wehr, im südlichen Schwarzwald, mit etwa 980 MW Generatorleistung, ist beim gleichzeitigen Einsatz aller vier Maschinen eine Leistungsänderungs-Geschwindigkeit von etwa 33 MW/s möglich – sogenannte Sekundenreserve. Die Einsatzdauer von Pumpspeicher-Kraftwerken bei Störungsfällen hängt von der Grösse der Speicher bzw. von der Möglichkeit der Beckenbewirtschaftung ab.

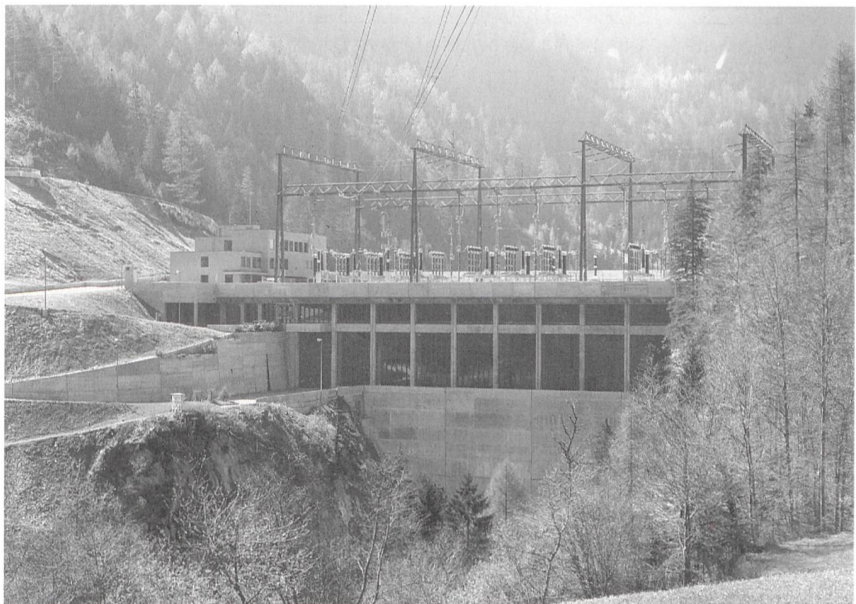
Leistungs-Frequenz-Regelung

Mit Hilfe der hohen Regelgeschwindigkeit dieser Anlagen können über die Sekundärregelung Leistungsschwankungen des Netzes und Ausfälle anderer kleinerer Kraftwerke ausgeglichen werden. Die Maschinenleistung wird im Turbinenbetrieb entsprechend den Netzerfordernissen automatisch geregelt. Bei einem extremen Bedarfsanstieg im Verbundnetz, der eine Frequenzverminderung zur Folge hat, werden die gegebenenfalls am Netz befindlichen Pumpen über ein Frequenzrelais abgeschaltet und die Maschinensätze in den Turbinenbetrieb überführt.

In diesem Zusammenhang ist eine grössere Netzstörung im französischen Verbundnetz 1978 zu nennen. Die überschüssige Kraftwerksleistung wurde in das südwestdeutsche Netz «geschoben», mit der Folge, dass die Frequenz von 49,95 auf 50,18 Hz anstieg. In den Pumpspeicher-Kraftwerken Wehr und Säckingen wurden deshalb innerhalb einer Minute die im Turbinen- und im Phasenschieberbetrieb befindlichen Maschinensätze in den Pumpbetrieb überführt, so



Stauanlage Hongrin (Veitaux-Hongrin, VD).



Pumpspeicher-Kraftwerk Mapragg (SG).

dass per Saldo eine Leistung von etwa 1500 MW aus dem Netz aufgenommen werden konnte. Hätte diese Möglichkeit nicht bestanden, wäre wahrscheinlich eine Überlastung der Leitungen eingetreten, die zu einer umfassenden Netzstörung im südwestdeutschen Raum geführt hätte.

Neben den genannten Hauptaufgaben der Pumpspeicher-Kraftwerke sind noch weitere, ebenfalls wichtige Einsatzmöglichkeiten zu nennen:

- Zurverfügungstellung von kapazitivem und induktivem Blindstrom zur Spannungshaltung.
- Hilfestellung bei Strom- und Spannungsprüfungen vor endgültigen Inbetriebnahmen von Grosstransformatoren, Freileitungen und Netzen.

- Hilfestellung bei Zusammenschaltungen von Netzteilen im europäischen Verbund und beim Aufbau eines Netzes nach einem Netzzusammenbruch («Schwarzstart»).

Diese Einsatzmöglichkeiten drücken sich in häufigen Änderungen der Betriebsarten (Turbinen-, Pumpen-, Phasenschieberbetrieb) der Maschinen aus, die manchmal nur Minuten andauern. Die Anzahl der Betriebsartenwechsel beträgt im Mittel rund fünf pro Maschinensatz und Tag. Je nach Lastsituation werden jedoch täglich bis zu 30 Umschaltungen je Maschinensatz registriert.

Die in einigen statistischen Übersichten und sonstigen Berichten ausgewiesenen Ausnutzungsdauern geben ein den

- **Ausnutzungsdauer T_{aN} (h/a)**
Quotient aus der gelieferten Wirkarbeit in einem Berichtsjahr und der Wirkleistung bzw. Netto-Engpassleistung (Kennwertbildung wie bisher)
- **Ausnutzungsdauer T_{aS} (h/a)**
Quotient aus der Scheinarbeit für Bezug und Lieferung- und der Generator-Scheinleistung
- **Zeitausnutzung (n_T)**
Quotient aus der Betriebszeit für alle Betriebsituationen aller Maschinensätze in einem Berichtsjahr und der Nennzeit aller Maschinensätze in einem Berichtsjahr (Kalenderzeit)
- **Zeitverfügbarkeit (k_T)**
Quotient aus der Summe der Betriebszeit und der Bereitschaftszeit (beides ergibt die Verfügbarkeitszeit) und der Nennzeit aller Maschinensätze in einem Berichtsjahr (Kalenderzeit).
- **Anzahl der Betriebsvorgänge**
Summe aller Betriebsvorgänge; ein spezifischer Wert ergibt sich bei einem Bezug auf die Anzahl der Maschinensätze.

Tabelle I Kennwerte der Betriebsdaten. Die rechnerische Ermittlung im einzelnen ist in [4] enthalten.

		1994	1995	1996
Anlagen-Anzahl		17	19	20
Maschinensatz-Anzahl		70	74	78
Wirkleistung	MW	5 968	6 101	6 261
Scheinleistung	MVA	7 070	7 210	7 386
Wirkarbeit				
Lieferung	GWh	4 580	5 315	5 164
Bezug	GWh	5 814	6 672	6 839
Blindarbeit				
Lieferung	Gvarh	2 282	2 663	2 633
Bezug	Gvarh	4 065	4 900	4 207
Scheinarbeit	GVAh	12 180	14 173	13 815
Ausnutzungsdauer T_{aN}	h/a	767	871	825
Ausnutzungsdauer T_{aS}	h/a	1 723	1 966	1 870
Zeitausnutzung n_T	%	53,1	54,8	53,8
Zeitverfügbarkeit k_T	%	84,9	87,7	86,6
Betriebsartenwechsel	Anzahl/a	126 709	128 666	134 915
Betriebsartenwechsel pro Maschinensatz	Anzahl/a	1 810	1 739	1 730

Tabelle II Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse.

wirklichen Verhältnissen nicht gerechtes Bild. Die Ausnutzungsdauer wird dabei auf die Wirkleistung bezogen; unberücksichtigt bleiben die Pumpzeiten, die Zeiten für den Phasenschieber-Betrieb und die Bereitschaftszeiten. Es ist davon auszugehen, dass diese Anlagen über 50% der Jahresnennzeit am Netz sind und entweder im Turbinen-, Pumpen-, Phasenschieberbetrieb – also als mitlaufende Reserve – arbeiten. Etwa 40% der Jahresnennzeit sind Bereitschaftszeiten und nur etwa 10% Nichtverfügbarkeitszeiten.

Betriebsdaten, Analysen 1994 bis 1996

Um die eingangs dargelegte Beurteilungssituation der bisher verfügbaren Betriebsdaten zu verbessern, erfolgte für die Jahre 1994 bis 1996 eine Erfassung weiterer Daten bei Betreibern, die im VDEW-Fachausschuss «Wasserkraft» vertreten sind.

Die Analyse erstreckte sich insgesamt auf 20 Anlagen (1996) mit einer Wirkleistung von 6261 MW.

Eine Übersicht über die Pumpspeicher-Kraftwerke gemäss VDEW-Statistik zeigt [4] (Tabelle Anhang A). Zusätzlich wurden das PSW Vianden (Luxemburg) berücksichtigt.

Ausser der bisher erfassten gelieferten Wirkarbeit wurde auch die bezogene Pumparbeit, die gelieferte und die bezogene Blindarbeit, die Summe aller Betriebszeiten und Reservezeiten/Bereitschaftszeiten sowie die Anzahl der Betriebsvorgänge für alle Maschinensätze erfasst.

Daraus lassen sich die Kennwerte ableiten (Tabelle I). Tabelle II zeigt die entsprechenden Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse.

Die Ausnutzungsdauer T_{aS} der Anlagen bei Berücksichtigung aller Betriebsarten erreichte im Durchschnitt der analysierten Jahre etwa 1850 Stunden pro Jahr.

Etwa 54% (nT) der gesamten Zeit eines Jahres waren die Maschinen in Betrieb; mit etwa 32% ($kT - nT$) in Bereitschaft, das ist die Zeit, in der die Anlagen auf Anforderung des Lastverteilers sofort in Anspruch genommen werden können. Pro Maschinensatz wurden etwa 1760 Betriebsvorgänge jährlich erreicht. Das heisst, dass innerhalb der (aktiven) Betriebszeit etwa alle eineinhalb bis drei Stunden ein Betriebsartenwechsel eingetreten ist.

Erzeugungskosten

Die Erzeugungskosten können für die gelieferte elektrische Energie (besonders Spitzenstrom) überschlägig ermittelt werden. Die «physikalischen Dienstleistungen», wie der Phasenschieberbetrieb, sind monetär nur schwer bezifferbar.

Bei einer spezifischen Investition, einschliesslich aller Finanzierungskosten und Nebenkosten, in der Spanne von etwa 1000 bis 1300 DM/kW ergeben sich bei einer Ausnutzungsdauer von 850 bis 1000 h/a kalkulatorische Kapitalkosten (8%, 30 a, Annuität = 8,88%) von etwa 9 bis 12 Pf./kWh. Die fixen Betriebskosten können mit etwa 1 bis 2 Pf./kWh



Ältestes Pumpspeicher-Kraftwerk der Schweiz (erstellt 1909): Engeweiher (SH).

Warum Pumpspeicherung?

(m/vse) Mit 57% Stromproduktionsanteil aus sauberer Wasserkraft gilt die Schweiz international als Musterknabe. Von dieser Wasserkraft entfällt etwas mehr als die Hälfte auf Speicherkraftwerke. Hier könnte die Pumpspeicherung, obwohl zurzeit noch nicht sehr bedeutend, in Zukunft einen höheren ökologischen Beitrag leisten.

Ausser der direkten Speicherung der Wasserkraft durch natürliche Zuflüsse (Regen- und Schmelzwasser) in die Stauseen kann Wasser auch in Staubecken hochgepumpt werden. Dabei unterscheidet man zwischen Umwälz-Pumpspeicherung und Saison-Pumpspeicherung.

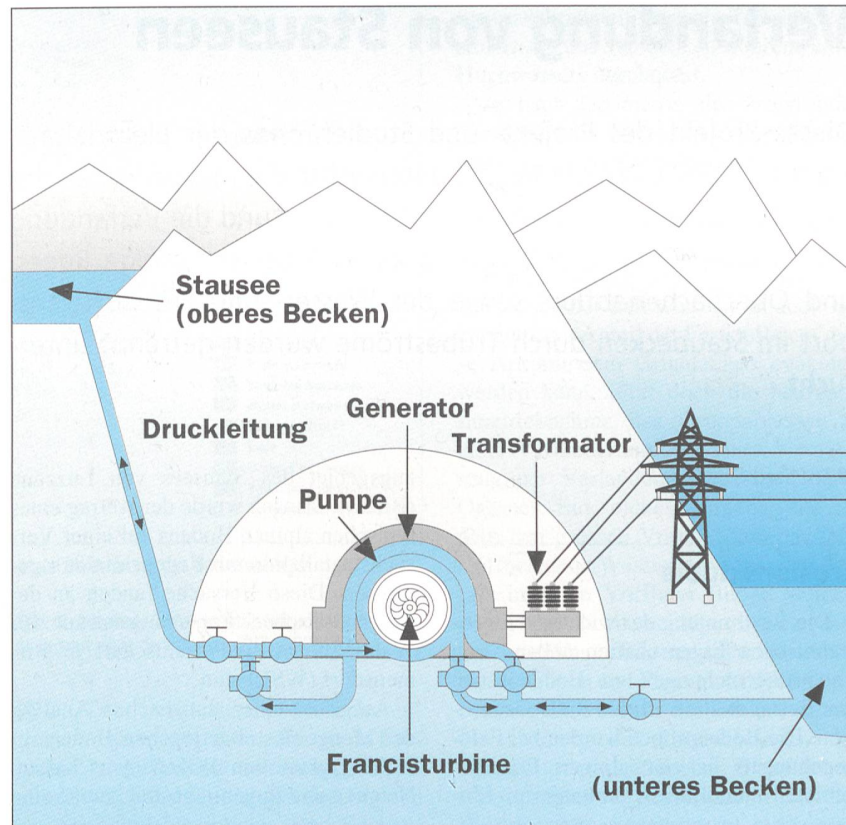
Tages- und Saisonspeicher

Bei der Umwälz-Pumpspeicherung werden geringe Wassermengen zum Ausgleich der täglichen und wöchentlichen Belastungsschwankungen im Stromverbrauch gepumpt (in Schwachlastzeiten nachts und am Wochenende) bzw. turbinert (in Starklastzeiten). Die Saison-Pumpspeicherung erlaubt es, die zum überwiegenden Teil im Sommer anfallende Wasserkraft (hohe Bandenergie z.B. aus Flusskraftwerken) auf die Wintermonate zu verschieben, in denen auch der Stromverbrauch sein Maximum aufweist. Das natürliche Wasserkraftangebot beträgt im Winterhalbjahr nur $\frac{1}{4}$ des gesamtjährigen.

Speicher statt zusätzliche Kraftwerke

Der Einsatz der umweltschonenden Pumpspeicherung erfolgt in der Schweiz aus wirtschaftlichen Erwägungen in bescheidenem Ausmass (Produktionsanteil aus Pumpspeicherung rund 2%). Es gibt gegenwärtig in der Schweiz 16 Speicherkraftwerke, die auch pumpspeichern können. Ihre mittlere jährliche Produktionserwartung aus dem Pumpspeicherbetrieb beträgt 1640 Mio. kWh (installierte Pumpleistung 1629 MW). Die unterschiedliche Produktionsstruktur sowie die unterschiedliche zeitliche Nutzung (täglich und saisonal) der elektrischen Energie machen die Pumpspeicherung energiewirtschaftlich und ökologisch sinnvoll. So kann zum Beispiel in Spitzenzeiten auf das gespeicherte Wasser zurückgegriffen werden, ohne neue Werke zu bauen oder zusätzlichen Strom aus dem Ausland einzuführen.

Pumpspeicheranlagen sind auch im europäischen Rahmen von Bedeutung. Grosse Lastschwankungen des europäischen Verbundnetzes infolge Verbrauchsspitzen oder Ausfall von grösseren Anlagen können praktisch nur durch Pump- und Speicherkraftwerke unverzüglich und flexibel ausgeglichen werden.



Pumpspeicherwerk (schematisch).

angesetzt werden. Die Pumpstromkosten können aus den variablen Grenzkosten vorhandener, nicht ausgelasteter Grundlastblöcke abgeleitet werden und liegen unter 4 Pf./kWh. Bei Berücksichtigung des Umwälzwirkungsgrades von etwa 75% ergeben sich dann spezifische Erzeugungskosten in einer Spanne von etwa 15 bis 20 Pf./kWh.

Der Pumpstrom gestattet – willkommenen Nebeneffekt – eine bessere Auslastung zum Beispiel der Grundleistungskraftwerke, die auch dann in Betriebsbereichen mit optimalem Wirkungsgrad

gefahren werden können. Zur Kostensituation siehe auch Unipede [5].

Literatur

- [1] VDEW-Jahresstatistik, Jahresberichte, VDEW, Frankfurt am Main.
- [2] Begriffe der Versorgungswirtschaft (VDEW, BGW) VDEW, Frankfurt am Main, Teile 1, 3, 5, jeweils jüngste Ausgaben.
- [3] Wagner, E.: Regenerative Energien – Bewertungs-, Einheiten- und Zuordnungsprobleme, Elektrizitätswirtschaft 8/93.
- [4] Pumpspeicher-Kraftwerke. Einsatz und Betriebsergebnisse. VDEW-Materialien M-35-97.
- [5] Unipede: Report 03005 Ren 9713, The Cost of Hydroelectricity, 1997.

Les centrales d'accumulation par pompage

Mise en action et résultats d'exploitation

A côté des installations de turbines à gaz pour les charges de pointe, les centrales d'accumulation par pompage constituent l'un des éléments essentiels d'un parc de centrales efficace et sûr, nécessaire à l'approvisionnement général en électricité. Les données publiées dans les statistiques ne permettent que difficilement de reconnaître l'apport des centrales. La durée d'utilisation des centrales – appelée couramment «heures de charge pleine» – indiquée dans ces mêmes statistiques se réfère uniquement au travail fourni effectivement, et ce avec des valeurs relativement faibles d'environ 1000 h/a. La contribution de ces centrales au pompage, déphasage et autres n'est pas prise en considération. La faible utilisation incorrecte tirée de la durée d'utilisation citée et les coûts élevés des installations en découlant ont poussé à réaliser une analyse des caractéristiques d'exploitation et à réunir d'autres faits sur l'utilisation de ces centrales.