Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 106 (2015)
Heft: 5

Artikel: Künftiger Beitrag der Fotovoltaik zur Energiewende
Autor: Remund, Jan / Shah, Arvind / Wyrsch, Nicolas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856644

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

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

Künftiger Beitrag der Fotovoltaik zur Energiewende

Finanzielle Aspekte und Fragen der Stromspeicherung

Der Ersatz von Strom aus den Kernkraftwerken durch Strom aus erneuerbaren Energien soll in den nächsten Jahrzehnten erfolgen. Dabei stellen sich hauptsächlich zwei Fragen: Wie soll die Speicherung der unregelmässig anfallenden erneuerbaren Beiträge erfolgen? Und was sind die finanziellen Belastungen für den Endverbraucher bei einer Fortführung der jetzigen Politik? Der vorliegende Artikel geht diesen beiden Fragen aufgrund von Modellrechnungen nach.

Jan Remund, Arvind Shah, Nicolas Wyrsch

Die Kernenergie stellt eine Bandenergie dar, also eine Energieform mit mehr oder weniger konstanter Ausgangsleistung. Im Rahmen der Energiewende soll sie vor allem durch erneuerbare Energien ersetzt werden, die in der Regel unregelmässig anfallen. Es ist davon auszugehen, dass dabei der grösste Anteil durch Strom aus Fotovoltaikanlagen geliefert werden wird. In der Tat besteht bei der Fotovoltaik nach übereinstimmenden Schätzungen das grösste Potenzial für den Ausbau. Strom aus Fotovoltaikanlagen wurde bisher oft als eine der teuersten erneuerbaren Energien angesehen, was heute aber nicht mehr zutrifft: Die Stromgestehungskosten für eine neue 100-kW-Anlage liegen im Sommer 2015 bei ca. 20 Rp./kWh. Allerdings sind die Fotovoltaik wie auch die Windenergie grossen Schwankungen unterworfen, sodass sich die Frage stellt, wie das Speicherproblem gelöst werden kann. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dieser Fragestellung. Er betrachtet dabei die Periode bis zum Abschalten der ersten drei Kernkraftwerke (KKWs), also eine Periode von etwa zehn Jahren, und geht dabei von folgenden Annahmen aus:

- Während dieser Zeit wird der Stromverbrauch konstant bleiben – durch die Massnahmen zum Stromsparen, die vom Bund und den Kantonen ergriffen werden, kann ein weiterer Anstieg des Stromkonsums gebremst werden.
- Der Strom aus den KKWs wird (fast) vollständig durch einen Ausbau der erneuerbaren Energien ersetzt – auf Nettoimporte von Strom aus dem Ausland wird verzichtet.
- In der betrachteten Zeitspanne werden keine neuen Technologien zur Stromspeicherung in grossem Stil zur Anwendung kommen, sodass die Speicherprobleme wie bisher durch hydroelektrische Speicherung gelöst werden müssen.

Der Beitrag betrachtet somit nur den Beginn der Energiewende – also den Ersatz von bloss einem Drittel des gesamten Stroms aus den Schweizer KKWs. Die Autoren sind aber der Ansicht, dass es sich hierbei um eine der schwierigsten Phasen handeln wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass am Ende dieser ersten Phase genügend Erfahrungen vorhanden sein werden, um die weitere Planung der Energiewende mit mehr Sicherheit vorzunehmen.

Abschalten der Kernkraftwerke

Die Schweiz betreibt im Moment fünf KKWs. In Tabelle 1 sind diese aufgeführt, inklusive den hauptsächlichen Betriebsdaten. Als Jahr für die Ausserbetriebnahme wird grundsätzlich von einer Betriebsdauer von 50 Jahren ausgegangen – wie es in der Botschaft des Bundesrates [1] im Jahr 2013 erwähnt wurde. Seither ist die vorgesehene Betriebsdauer der KKWs nicht mehr klar festgelegt. Das Parlament hat lediglich beschlossen, dass die einzelnen Anlagen periodisch auf ihre Sicherheit kontrolliert werden sollen. Je nach Resultat dieser Kontrolle sollen sie entweder abgeschaltet werden oder die Betriebsdauer wird für weitere zehn Jahre verlängert. Einzig beim KKW Mühleberg hat sich die Betreiberin BKW auf eine vorzeitige Abschaltung im Jahr 2019

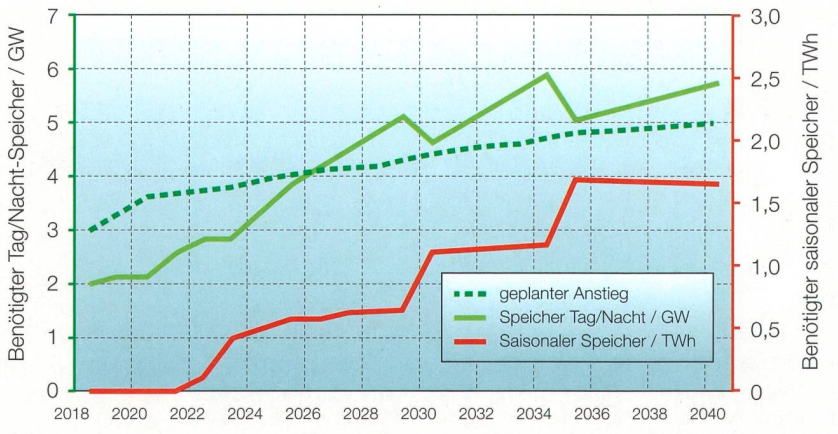

Bild 1 Benötigter Ausbau von Pumpspeichern (Tag/Nacht-Ausgleich) und von Speicherseen (saisonaler Ausgleich), nach dem Szenario der Autoren: Annahmen für «geplanter Anstieg»: Existierende und im Bau befindliche Anlagen bis 2022, danach leichter Anstieg (ca. die Hälfte der potenziellen Anlagen).

Kernkraftwerk (KKW)	Durchschnittliche Energieproduktion	Inbetriebnahme	Voraussichtliches Abschaltjahr
Mühleberg	2,9 TWh/Jahr	1972	2019
Beznau I	2,9 TWh/Jahr	1969	2022
Beznau II	2,8 TWh/Jahr	1972	2022
Gösgen	7,6 TWh/Jahr	1979	2029
Leibstadt	9,1 TWh/Jahr	1984	2034

Tabelle 1 Kernkraftwerke der Schweiz; Energieproduktion (Schnitt der Jahre 2009–2013) und Daten von Inbetriebnahme und möglichem Abschalten (BFE, 2014 [2]).

festgelegt; dies deshalb, weil eine Erneuerung dieses KKWs zu teuer zu stehen kommen würde.

Das Kernkraftwerk Beznau I ist das älteste KKW der Welt, das heute noch in Betrieb ist. Hier wird angenommen, dass es zusammen mit dem KKW Beznau II im Jahr 2022 abgeschaltet werden wird, wenn Letzteres eine Betriebsdauer von 50 Jahren erreicht haben wird. Es ist im Moment unmöglich zu sagen, ob dies tatsächlich so stattfinden wird oder nicht. Für die Planung des Stromnetzes ist ein Abschalten der KKWs Beznau I und II im Jahre 2022 jedoch eine durchaus realistische Annahme.

Ersatz des Nuklearstroms durch erneuerbare Energien

Geht man von den Angaben in Tabelle 1 sowie von einem konstanten Stromverbrauch aus, so sind bis 2022 jährlich insgesamt 8,6 TWh Nuklearstrom durch andere Energiequellen zu ersetzen.

Tabelle 2 führt auf, wie dies auf die verschiedenen Energiequellen verteilt werden könnte. Die Tabelle zeigt auch die Potenziale der verschiedenen Formen der erneuerbaren Energien. [3, 4, 5] Das Ausbau-Szenario für 2022 ist ein Vorschlag der Autoren: Bei der Wasserkraft ist das Potenzial für einen Ausbau relativ gering, auch stösst man hier auf Einschränkungen, die vom Gewässerschutz herrühren; bei der Windenergie besteht Widerstand aus den Kreisen des Landschaftsschutzes. Deshalb kann die Annahme getroffen werden, dass der grösste Anteil des neu zu liefernden Stroms von der Fotovoltaik geliefert wird. Bei diesem Szenario wird ein geringer Ausbau von Gas- und Dampfkraftwerken und Blockheizkraftwerken angenommen: von heute etwa 4 TWh/Jahr (einschliesslich Kehrichtverbrennungsanlagen) auf etwa 5 TWh/Jahr. An sich ist ein schneller Ausbau bei den Gaskraftwerken durchaus möglich, hingegen ist dies wegen der globalen Erwärmung nicht wünschenswert.

Speicherung des Stroms aus Fotovoltaikanlagen

Die Schweiz besitzt im Moment mit den Speicherseen eine effiziente Möglichkeit für die Stromspeicherung und für den Ausgleich zwischen Stromproduktion und Strombedarf. Andererseits besitzt die Schweiz – im Gegensatz zu den meisten anderen europäischen Ländern – nur einen ganz kleinen Anteil an fossilen Kraftwerken, welche kurzfristig an- und abgeschaltet werden können. Zurzeit dienen die Speicherseen vor allem dazu, den Ausgleich zwischen den Flusskraftwerken (welche im Sommer mehr Strom liefern als im Winter) sowie den KKWs (mit ihrer annähernd konstanten Stromproduktion) einerseits und dem Stromverbrauch anderseits zu erreichen. Der Stromverbrauch ist im Winter deutlich höher als im Sommer, aufgrund der Elektroheizungen und der Wärmepumpen. Eine saisonale Speicherung wird dadurch erreicht, dass man die Speicherseen im Sommer füllt und im Winter entleert. Es ist aber auch ein kurzfristiger Ausgleich über den Tagesverlauf nötig, z.B. wenn die Summe der Produktion der Laufwasserkraftwerke und der KKWs höher ist als die Last – dazu werden die Pumpspeicherwerke verwendet.

Die genau gleichen Werkzeuge können dazu verwendet werden, den unregelmässig anfallenden Strom aus Fotovoltaik- und Windanlagen auszugleichen. Der benötigte Speicherbedarf wurde durch ein Programm von Meteotest simuliert, ausgehend von den tatsächlichen stündlichen Meteodaten zwischen 2008 und 2012 und dem geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien nach dem Szenario, das oben angegeben wird. Für die Jahre nach 2022 wurde angenommen, dass die KKWs weiterhin nach 50 Jahren abgeschaltet werden; sie sollen überdies vom gleichen Mix an erneuerbaren Energien wie für die erste Phase angenommen ersetzt werden.

Das Resultat ist in Bild 1 dargestellt: Bis 2022 sind praktisch keine zusätzlichen Kapazitäten bei den Speicherseen nötig, Bei den Pumpspeicherwerken ist der schon vorgesehene Ausbau durchaus genügend, um den zusätzlichen Bedarf abzufangen.

Bei der Fortsetzung der Energiewende wäre ein Ausbau der Pumpspeicherwerke (oder ein Einsatz von anderen Speichertechnologien wie Batterien oder Wärmespeichern) auf eine totale Leistung von ca. 6 GW nötig. Das Problem könnte teilweise auch mit Lastverschiebungen gelöst werden.

Die saisonalen Speicherseen müssten um eine zusätzliche Speicherkapazität von ca. 1,6 TWh erweitert werden, was gemäss aktuellen Einschätzungen zum Potenzial der Wasserkraft [6] durchaus realistisch ist.

Energiequelle		Aktuelle Jahresleistung/TWh	Langfristiges Potenzial / TWh	Ausbau-Szenario für 2022 / TWh, Strom-«Mix»	Anteile des 2022 neu zu liefernden Stroms
Wasserkraft	Saisonale Speicherung	8,8	10,8	Kein Ausbau nötig	–
	Aus Speicherseen	20,6	22	0,4	5 %
	Pumpspeicher (Momentan-Leistung in GW)	3,3 GW	8 GW	≈ 4 GW	–
	Flusskraftwerke	15,6	17	0,4	5 %
Fotovoltaik		1	15	5,2	57 %
Wind		unbedeutend	5	1,4	16 %
Biomasse		unbedeutend	?	0,8	9 %
Gas und Wärme-Kraft-Kopplungen		≈ 4	?	0,8	9 %

Tabelle 2 Energiequellen, jetzige Jahresleistung, Potenzial und Szenario 2022.

Bilder: Autoren

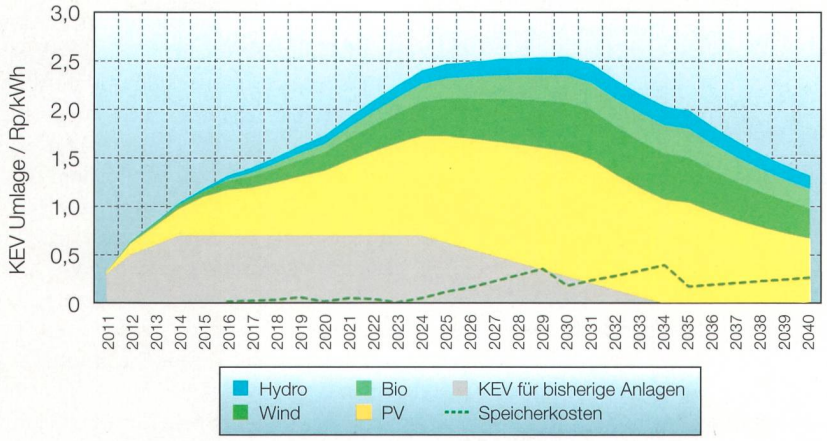

Bild 2 Schätzungen für den benötigten finanziellen Aufwand für die Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Energieformen, entsprechend den Annahmen der Autoren; geschätzter finanzieller Aufwand für die Speicherung der erneuerbaren Energien.

Der Zubau erfordert ab 2022 zusätzliche Speichermöglichkeiten. Das Abschalten von KKWs führt zu einem Anstieg des saisonalen Bedarfs, aber kurzfristig auch zu einer Senkung des Tag/Nacht-Speicherbedarfs, da die Stromproduktion der KKWs konstant ist. Ohne Ausbau der saisonalen Speicherseen würde sich das heute bestehende Verhältnis zwischen Export im Sommer und Import im Winter noch weiter verstärken. Für die Zeit nach 2035 wurde angenommen, dass der saisonale Speicherbedarf leicht absinken wird aufgrund der Klimaänderung, die wahrscheinlich zu kürzeren Wintern führen wird.

Kosten der unterstützenden Massnahmen

Die Autoren haben die Aufwendungen für die Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) und für die Speicherung des Stroms aus erneuerbaren Energien abgeschätzt. Die Resultate sind in Bild 2 dargestellt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die durchschnittliche KEV für die Fotovoltaik wird bis 2023 auf den Wert von 16,4 Rp./kWh abgesenkt, danach findet noch eine geringe Absenkung von 1 % pro Jahr statt.
- Die KEV für die Windenergie wird auf 20 Rp./kWh gesetzt, mit einer Abnahme auf 15 Rp./kWh bis 2030.
- Alle anderen KEV-Ansätze (z.B. für Wasserkraftwerke) liegen konstant bei 15 Rp./kWh.
- Die Laufzeit der KEV beträgt vereinfachend überall 20 Jahre.
- Die Stromproduktionskosten sinken bis 2015 auf 5 Rp./kWh und steigen dann langsam bis 2050 auf 14 Rp./kWh an (in der Annahme, dass alle Kraftwerkstypen Kosten von rund 15 Rp./kWh aufweisen und der Kraftwerkspark bis 2050 weitgehend erneuert werden muss).
- Die Kosten für die zentrale Speicherung betragen 15 Rp./kWh (für die Leistungsübertragung durch das Stromnetz und für die Pumpspeicherung). Diese Kosten sind wesentlich geringer als die Belastung durch die KEV.

Die maximalen KEV-Aufwendungen würden nach diesen Modellrechnungen um 2030 erreicht werden und dann für den Stromverbraucher 2,5 Rp./kWh betragen. Nachher würden die Kosten für die KEV wieder sinken. In den Modellrechnungen wird weiter angenommen, dass um 2050 alle neuen Anlagen für die Stromerzeugung (sowohl jene, die auf erneuerbaren Energien beruhen, als auch die anderen) Strom zum Preis von 15 Rp./kWh produzieren werden.

Die Kosten im Falle einer Erneuerung mit konventionellen Kraftwerken, die fossil oder nuklear betrieben werden, dürften kaum tiefer liegen. Zudem fallen bei beiden langfristige Kosten an (CO_2-, Sicherheits- und Lagerungskosten), die nicht gedeckt sind.

Schlussfolgerungen

Nach den Modellrechnungen der Autoren würden selbst bei einem Abschalten der Kernkraftwerke nach 50 Jahren Laufzeit und einem Ersatz des Nuklearstroms hauptsächlich durch Strom aus erneuerbaren Quellen keine Engpässe in der Stromspeicherung auftreten. Der Grund dafür: Das hydroelektrische Speichersystem des schweizerischen Stromnetzes ist bereits jetzt sehr leistungsfähig. Ein weiterer Ausbau findet zurzeit schon statt und könnte bis 2050 so stark vorangetrieben werden, dass bei der Speicherung keine Engpässe auftreten würden. Die finanziellen Aufwendungen für die Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) und für die Speicherung des Stroms aus erneuerbaren Energien sind ebenfalls durchaus tragbar und würden

Résumé **Future contribution de l'énergie photovoltaïque au tournant énergétique**

Questions et aspects financiers du stockage de l'énergie

Dans les années à venir, le courant provenant de centrales nucléaires doit être remplacé par des énergies renouvelables, en particulier par l'énergie photovoltaïque. Deux questions se posent dans ce contexte : comment stocker les énergies renouvelables produites de manière irrégulière ? Et quel est le montant de la facture pour le consommateur final ?

Le présent article traite ces deux questions sur la base de modèles de calcul. Ainsi, une simulation du besoin en stockage a été effectuée par un programme de Meteotest à partir des données météorologiques effectives relevées toutes les heures entre 2008 et 2012. Cette simulation montre que pratiquement aucune capacité supplémentaire des bassins d'accumulation ne sera nécessaire jusqu'en 2022. Dans le cadre de la poursuite du tournant énergétique, il serait nécessaire d'étendre les centrales de pompage-turbinage afin d'atteindre une puissance totale d'environ 6 GW.

Quant à la question relative aux coûts, les auteurs ont évalué les dépenses pour la rétribution à prix coûtant (RPC) du courant injecté et pour le stockage du courant issu d'énergies renouvelables. Les calculs ont montré que les dépenses RPC maximales seraient atteintes autour de 2030 et qu'elles se monteraient alors à 2,5 centimes/kWh pour le consommateur d'électricité. Ensuite, d'après les calculs, les coûts devraient à nouveau baisser pour la RPC. On peut donc en conclure que le système de stockage hydroélectrique en Suisse est d'ores et déjà très performant et que les coûts sont supportables pour le consommateur final. Par conséquent, aujourd'hui, le tournant énergétique dépend encore surtout des décisions politiques alors que, d'un point de vue technique, aucun obstacle majeur ne subsiste. Se

den Endverbraucher des Stroms auch in den Spitzenjahren um 2030 um weniger als 3 Rp./kWh belasten.

Ob die Energiewende, d.h. der konkrete Übergang von Nuklearstrom zu Strom aus erneuerbaren Energien, so rasch wie hier angenommen stattfindet, ist jedoch noch von politischen Entscheiden abhängig – technische Hindernisse gibt es hingegen nicht.

Eine weitere offene Frage ist, ob der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Schweiz nach wie vor zügig vorangetrieben wird – dies hängt von allen Akteuren der Energiepolitik ab: Bund, Kantonen, Gemeinden, Elektrizitätswerken, Besitzern von geeigneten Dächern für Solarinstallationen usw. Die Autoren sind der Ansicht, dass dies in den nächsten 10 bis 15 Jahren stattfinden wird, sofern der jetzige Rahmen an unterstützenden Massnahmen aufrechterhalten und wenn möglich noch ausgebaut werden kann. Damit wird man aber bis ca. 2025 genügend Erfahrung sammeln können, um den weiteren Verlauf der Energiewende auch zu meistern.

Referenzen

[1] Botschaft 13.074 zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative «Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)», 4. September 2013, Abschnitt 2.2, Seite 7592, basierend auf Bericht BFE/Prognos, Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, 12.09.2012.
[2] Bundesamt für Energie BFE, Elektrizitätsstatistik 2013.
[3] Bundesamt für Energie BFE, Wasserkraftpotenzial der Schweiz, Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050, herausgegeben 2012, S. 8–14.
[4] R. Pfammatter, Ausbaupotenzial der Wasserkraft, Bulletin SEV/VSE 2/2012, S. 8–14
[5] Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Energiestrategie 2050, Berechnung der Potenziale für Wind- und Sonnenenergie, 2012.
[6] Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband , Wasserkraftpotenzial der Schweiz, Faktenblatt Juli 2012.

Autoren

Jan Remund ist Geschäftsbereichsleiter Sonne und Klima bei Meteotest.

Meteotest, 3012 Bern
jan.remund@meteotest.ch

Prof. Dr. **Arvind Shah** ist Gründer des Labors für Fotovoltaik am IMT Neuchâtel sowie emeritierter Professor der Universität Neuchâtel und EPFL.

Arvind Shah, 2022 Bevaix
arvind.shah@unine.ch

Dr. **Nicolas Wyrsch** ist Lehrbeauftragter und Bereichsleiter am Labor für Fotovoltaik der EPFL.

EPFL STI - PV-Lab, 2002 Neuchâtel 2
nicolas.wyrsch@epfl.ch

Anzeige