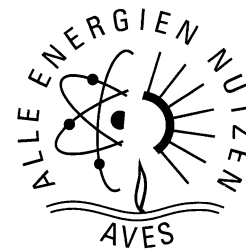


AVES Pfannenstil

Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES)
Regionalgruppe Pfannenstil
c/o Dr. Hans R. Moning AG, Gotthardstrasse 10, 8800 Thalwil
Postkonto 80-10120-3
www.aves-zh.ch



BULLETIN Nr. 65

November 2011

Atomausstieg – Befreiungsschlag oder energiepolitischer Blindflug?

Liebe Leserin, lieber Leser

Nach dem Bundesrat haben sich der Nationalrat und schliesslich auch der Ständerat für den Ausstieg der Schweiz aus der Kernenergie ausgesprochen. Die bestehenden Kernkraftwerke sollen noch bis zum Ende ihrer Laufzeit Strom produzieren, aber danach nicht durch neue Kernkraftwerke ersetzt werden. Auf welche Weise die wegfallende elektrische Energie kompensiert werden soll, ist zurzeit noch offen. Die einen – eher euphorisch gestimmten – erleben den "Atomausstieg" als Befreiungsschlag. Die anderen, die sich mit den Fakten vertieft und mit Sachkenntnis auseinandersetzen, sehen auch die enormen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, die mit der Realisierung der "Energiewende" verbunden sind. Als Physiker zählt der Autor des vorliegenden Bulletins, Arthur Ruh, zur zweiten Kategorie. Wer vor einem energiepolitischen Blindflug mindestens wissen möchte, wo Hindernisse und Gefahren lauern, wird seinen Beitrag "Schweiz ohne Atomstrom?" bestimmt mit grossem Interesse lesen.

Exkursion der AVES Regionalgruppe Pfannenstil in das Felslabor Mont Terri



Opalinuston gilt aufgrund umfassender Abklärungen als ideales Gestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. Auf einer von der AVES Regionalgruppe Pfannenstil veranstalteten Exkursion in das Felslabor Mont Terri (St-Ursanne) konnte sich am 1. Oktober 2011 ein interessierter Teilnehmerkreis von der gewissenhaften und breit abgestützten Vorgehensweise bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Eigenschaften des Opalinustons aus eigener Anschauung überzeugen.

AVES Regionalgruppe Pfannenstil
Hans R. Moning

Inhalt

Schweiz ohne Atomstrom?

Seite 2

Schweiz ohne Atomstrom ?

Dr. Arthur Ruh, dipl. Physiker ETH

Nachdem der Bundesrat am 25. Mai 2011 den „Atomausstieg“ beschlossen hatte, stimmte der Nationalrat am 8. Juni dem Ausstieg zu. Die bestehenden Kernkraftwerke sollen noch bis zum Ende ihrer Laufzeit Strom produzieren, aber danach nicht durch neue Kernkraftwerke ersetzt werden. Unter der Annahme einer Lebensdauer von 50 Jahren müssten gemäss diesem Beschluss das KKW Beznau I im Jahr 2019, die KKW Beznau II und Mühleberg im Jahr 2022 und die KKW Gösgen und Leibstadt in den Jahren 2029 und 2034 vom Netz genommen werden. Auf welche Weise die fehlende Energie ersetzt werden solle, konnte jedoch weder der Bundesrat noch der Nationalrat konkret sagen. Mit Voten wie „Der Ausstieg ist technisch und wirtschaftlich machbar“ ist das Problem noch nicht gelöst.

Der Ersatz der Energieproduktion der schweizerischen Kernkraftwerke

Die schweizerischen Kernkraftwerke produzieren pro Jahr 25'000 bis 26'000 GWh¹. Dies entspricht je nach Produktion der Wasserkraftwerke 38 bis 42 % der schweizerischen Stromerzeugung.

Stromsparpotenzial

Oft wird behauptet, durch geeignete Sparmassnahmen könnte ohne weiteres die Stromproduktion von einem oder gar von mehreren Kernkraftwerken eingespart werden. Diese meist ziemlich optimistisch geschätzten Einsparungen liessen sich aber nur durch den Ersatz älterer Geräte realisieren. Dies ist jedoch ein Prozess, der Jahrzehnte beansprucht. Zudem ist Energiesparen und Stromsparen nicht dasselbe. Die ebenfalls geforderten Einsparungen an fossilen Brennstoffen haben häufig einen Mehrverbrauch an Strom zur Folge (z.B. Ersatz von Ölheizungen durch elektrisch betriebene Wärmepumpen, Einsatz von Elektromobilen). Infolge der Bevölkerungszunahme und der ständig zunehmenden Anwendungen von stromverbrauchenden Geräten ist bisher der Stromverbrauch trotz aller Sparmassnahmen stets gewachsen.

Die bei der Stilllegung der schweizerischen Kernkraftwerke wegfallende Stromproduktion muss daher durch andere Arten der Stromerzeugung ersetzt werden.

Stromimport (Siehe auch Bulletin Nr. 61)

Es kann nicht erwartet werden, dass nach Ausserbetriebsetzung der schweizerischen Kernkraftwerke die fehlende Stromproduktion auch nur teilweise durch Stromimporte ersetzt werden kann. Italien ist schon seit Jahren auf Stromimporte angewiesen, und Deutschland importiert ebenfalls Strom, seit es 7 seiner KKW stillgelegt hat. Es wäre völlig inkonsequent, wenn die Schweiz die Kernkraftwerke, die das Ende ihrer Laufzeit erreichen, nicht ersetzen würde, aber dafür Atomstrom aus Frankreich importieren würde. Zudem stellt sich die Frage, woher der Importstrom kommen soll, falls auch Frankreich den Atomausstieg beschliessen würde. Keiner der anderen europäischen Staaten ist in der Lage, in hinreichender Menge Strom zu exportieren.

Ein massiver Stromaustausch zwischen den Staaten scheitert auch an der maximalen Belastbarkeit des bestehenden Stromnetzes. Ein entsprechender Ausbau des europäischen Stromnetzes beansprucht jedoch Jahrzehnte. An der nicht hinreichenden Netzkapazität scheitert auch die Idee, Strom im Bereich von mehreren 1000 MW aus Windparks in der Nordsee zu importieren. Deutschland würde wohl kaum bereit sein die Trassees für die dafür notwendigen Hochspannungsleitungen zur Verfügung zu stellen.

¹ GWh = Gigawattstunde, MWh = Megawattstunde, kWh = Kilowattstunde, Wh = Wattstunde
1 kWh = 1000 Wh, 1 MWh = 1000 kWh, 1 GWh = 1000 MWh = 1'000'000 kWh

Noch fragwürdiger ist das Projekt „Desertec“. In den Wüstenregionen soll mit solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken und an den Küsten mit Windkraftwerken Strom produziert und durch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen zu den Verbrauchszentren geleitet werden. Abgesehen von den nicht unbedeutlichen technischen und umwelttechnischen Problemen (z.B. Übertragungsleitungen von Nordafrika bis Mitteleuropa, Sandstürme in der Wüste!) ergäbe sich die Gefahr politischer Abhängigkeit und sogar Erpressbarkeit.

Der Wegfall der Stromproduktion der schweizerischen KKW muss daher durch inländische Stromproduktion kompensiert werden.

Stromproduktion mit Hilfe von erneuerbaren Energien

Wenn die Stromproduktion der KKW ersetzt werden soll, ohne dass CO₂-produzierende thermische Kraftwerke eingesetzt werden, kommen folgende Arten von Kraftwerken in Frage:

1. Wasserkraftwerke
2. Windkraft-Anlagen
3. Photovoltaik-Anlagen
4. Geothermische Kraftwerke
5. Biomassekraftwerke

Leistung und Energieproduktion von Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen

Wenn von Photovoltaik- oder Windkraft-Anlagen die Rede ist, begegnet man immer wieder dem gleichen dummen Überlegungsfehler: Es wird die Anlagenleistung mit der Leistung eines Kernkraftwerks verglichen. Zum Beispiel wird ein im Bau befindliches neues Solarkraftwerk beschrieben, das eine Leistung von 1000 MW liefern soll. Der Untertitel des Artikels „Solar-energie aus der Wüste“ lautet „Ein Solarkraftwerk in Kalifornien soll so viel Energie liefern wie ein Atomkraftwerk“². Das ist nur ein Beispiel des stets gleichen Trugschlusses. Es wird von der *Energieproduktion* eines Solar- oder Windkraftwerks gesprochen, aber dabei wird die *Leistung* des Solar- oder Windkraftwerks mit der *Leistung* eines Kernkraftwerks verglichen.

Photovoltaik-Anlagen

Ein Kernkraftwerk mit einer Leistung von 1000 MW liefert diese Leistung praktisch ununterbrochen während 7000 bis 8000 Stunden pro Jahr, ein Photovoltaik-Kraftwerk mit 1000 MW Nennleistung liefert dagegen im Winter bei bedecktem Himmel nahezu nichts und in der Nacht gar nichts. Vom 24. bis 28. Dezember 2010 war das Maximum der Summe aller Photovoltaik-Anlagen in Deutschland mit einer totalen Nennleistung von 15,9 GW (30.11.2010) stets kleiner als 0,1 GW, d.h. sogar um die Mittagszeit lieferten die Anlagen weniger als 1 % ihrer Nennleistung [PVL].

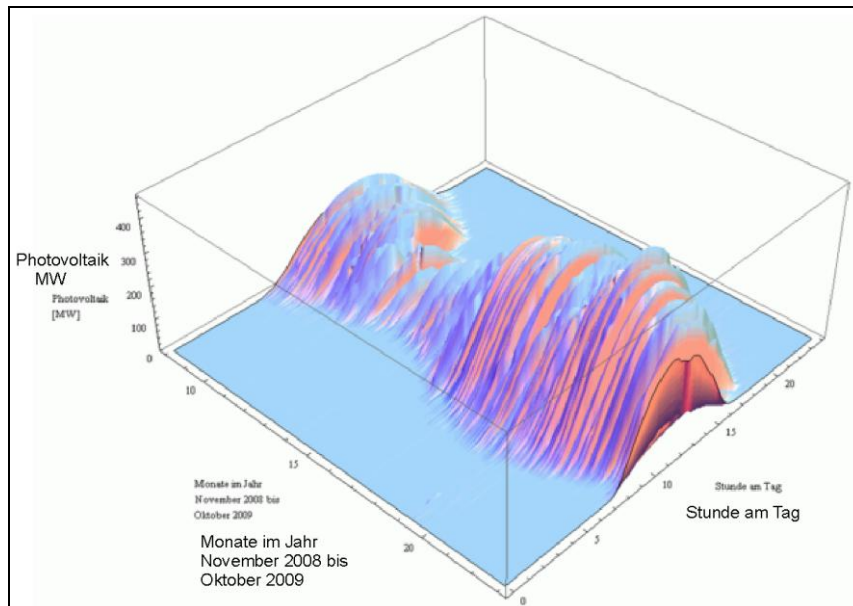
Die Nennleistung einer Photovoltaik-Anlage wird bei einer Strahlungsstärke von 1000 W/m², 25 °C Modultemperatur und einer Luftmasse³ von 1,5 gemessen. Eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² tritt in Mitteleuropa jedoch nicht sehr häufig auf, und bei dieser Bestrahlungsstärke erreichen im normalen Betrieb die Solarzellen eine wesentlich höhere Temperatur als 25 °C und haben deshalb einen tieferen Wirkungsgrad als im Test. An einem heissen Sommertag können die Module Temperaturen bis zu 70 °C erreichen. Dabei liefern sie bis zu 20 % weniger Leistung als bei 25 °C.

Eine Einstrahlung von 1000 W/m² lässt sich in der Regel nur erreichen, wenn die Solarzellen optimal zur Sonne ausgerichtet sind. Da die Solarzellenpanels bei den meisten grossen Anla-

² Neue Zürcher Zeitung, 8. August 2011, Seite 19.

³ Die Luftmasse ist ein relatives Mass für die Länge des Weges, den das Licht eines Himmelskörpers durch die Atmosphäre der Erde bis zum Erdboden zurücklegt. Bei einem Zenitwinkel von 0, d.h. wenn das Licht senkrecht auf die Erdoberfläche einfällt, ist die Luftmasse gleich 1. Eine Luftmasse von 1,5 entspricht einem Zenitwinkel von 48,3°.

gen nicht der Sonne nachgeführt werden, sondern unter einem bestimmten Winkel fest montiert sind, wird die optimale Einstrahlung wenn überhaupt nur während kurzer Zeit am Tag und nur an wenigen Tagen des Jahres erreicht. Zudem bezieht sich die für eine Anlage genannte Nennleistung auf den von der Anlage gelieferten Gleichstrom. Für die Einspeisung ins Stromnetz muss dieser aber erst noch in Wechselstrom umgewandelt werden. Wechselrichter für Photovoltaik-Anlagen haben Wirkungsgrade zwischen 92 und 98 %. Die von einer Anlage erreichte Maximalleistung liegt daher praktisch immer deutlich unter der Nennleistung⁴.



Täglicher und jährlicher Verlauf der von Photovoltaik-Anlagen abgegebenen Leistung
(Dr. Peter Klamser, Wikipedia)

Die stets bei Photovoltaik-Anlagen angegebene Nennleistung ist nützlich, um die Grösse von Anlagen miteinander vergleichen zu können. Sie sagt jedoch wenig bis gar nichts über die Energieproduktion der Anlage, sondern verführt nur zu völlig untauglichen Vergleichen.

Die wesentliche Kenngrösse einer Solar- oder Windkraft-Anlage ist die pro Jahr im Mittel produzierte Energie. Der Energieertragswert einer Anlage, d.h. die im Jahr produzierte Energie in kWh pro installiertes kW Nennleistung, kann durch die Zahl der Volllaststunden⁵ ausgedrückt werden. Die Zahl der Volllaststunden einer Anlage eignet sich für den Vergleich der Anlage mit einem Kernkraftwerk, da ein KKW rund 8000 Volllaststunden erreicht.

Die Zahl der Volllaststunden einer Photovoltaik-Anlage beträgt in Kalifornien 2150, während sie im schweizerischen Mittelland zwischen 900 und 1100 liegt und in den Alpen bis zu 1600 erreicht. Somit liefert ein Photovoltaik-Kraftwerk mit einer Nennleistung von 1000 MW im schweizerischen Mittelland in einem Jahr bis zu 8,9-mal weniger Energie als ein 1000-MW-Kernkraftwerk. Eine PV-Anlage in den Alpen liefert immer noch bis zu 5-mal weniger Energie als ein KKW.

⁴ Dazu folgende Beispiele:

Die Photovoltaik-Anlage auf dem Dach des „Stade de Suisse“ hat eine Nennleistung von 1300 kW. Am 17.8.2010, an einem wolkenlosen Tag mit tiefblauem Himmel, war die um die Mittagszeit maximal produzierte Leistung nur 900 kW.

Die in Deutschland installierten PV-Anlagen mit einer totalen Nennleistung von 18,4 GW (31.05.2011) erreichten nur an wenigen Tagen im Juli und August 2011 eine totale Leistung, die über 50 % lag. Die maximale Leistung war 12,7 GW [PVL].

⁵ Volllaststunden = jährliche Energieproduktion / Nennleistung

Windkraft-Anlagen

Entsprechende Überlegungen gelten auch für Windkraftanlagen. Die für eine Windkraft-Anlage angegebene Nennleistung bezieht sich auf eine maximale Leistung, die die Anlage bei optimaler Windstärke abgibt. Bei schwächerem Wind ist die Leistung entsprechend geringer und bei zu starkem Wind wird die Anlage aus Sicherheitsgründen ganz abgeschaltet oder bei modernen Anlagen wird die Leistung durch Verstellen der Propellerblattwinkel auf die Nennleistung heruntergeregelt. Die abgegebene Leistung geht mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Wenn die Windgeschwindigkeit halb so gross ist wie die Windgeschwindigkeit für die Nennleistung, ist die abgegebene Leistung nicht etwa halb so gross wie die Nennleistung, sondern nur ein Achtel der Nennleistung. Wenn die Windgeschwindigkeit unterhalb der Einschaltgeschwindigkeit liegt, läuft die Windenergieanlage gar nicht und die abgegebene Leistung ist gleich null. Wieder kann der tatsächliche Energieertrag durch die Zahl der Volllaststunden beschrieben werden. Die meisten der bisher in der Schweiz installierten Windkraftanlagen erreichen weniger als 2500 Volllaststunden.

Falsche Aussagen

Alle Aussagen der Art „x Photovoltaik-Anlagen/Windkraftanlagen vom Typ y können ein 1000-MW-Kernkraftwerk ersetzen“, sind daher völlig falsch, denn bei Nacht und/oder bei Windstille liefern diese Anlagen gar nichts.

Potenziale und Grenzen erneuerbarer Energien in der Schweiz

Wasserkraftwerke

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des Bundesamtes für Wasser und Geologie wurde im Jahr 2004 eine Studie erstellt über das Ausbaupotenzial der Wasserkraft [APW]. Es wurden verschiedene Szenarien bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen betrachtet. Als maximal technisch mögliches Ausbaupotenzial der Jahresproduktion der Wasserkraftwerke ergab sich bis zum Jahr 2050 eine Produktionszunahme von 7570 GWh pro Jahr. Das unter günstigen Rahmenbedingungen realistisch mögliche Ausbaupotenzial beträgt jedoch nur 5400 GWh pro Jahr, also 21 bis 22 % der wegfallenden 25'000 bis 26'000 GWh der KKW.



Grimsel-Stausee (© Edith Dunkel, Meiringen)

Windkraft-Anlagen (Siehe auch Bulletins Nr. 5, 47 und 48)

Der bisher grösste Windpark der Schweiz befindet sich auf dem Mont Crosin im Schweizer Jura. Er besteht aus folgenden Anlagen:

Typ Vesta	V44	V47	V52	V66	V90
Anzahl Anlagen	3	1	2	2	8
Rotordurchmesser (m)	44	47	52	66	90
Nabenhöhe (m)	45	45	50	67	95
Einschaltgeschwindigkeit (m/s)	4	4	4	4	4
Nenngeschwindigkeit (m/s)	16	16	16	16	12
Abschaltgeschwindigkeit (m/s)	25	25	25	25	25
Nennleistung (kW)	600	660	850	1750	2000
Baujahr	1996	1998	2001	2004	2010

In den Jahren 2006 bis 2009, als die Anlagen V44 bis V66 voll in Betrieb waren mit einer totalen Nennleistung von 7,66 MW, betrug die jährliche Energieproduktion des Windparks zwischen 8,52 und 9,70 GWh. Dies entspricht einer Volllaststundenzahl von 1112 bis 1266. Mit dieser Volllaststundenzahl kann für den ganzen Windpark mit 16 Anlagen und einer totalen Nennleistung von 23,66 MW eine jährliche Energieproduktion zwischen 26,3 und 30,0 GWh erwartet werden.

Um die wegfallende KKW-Stromproduktion zu kompensieren, müssten also in der Schweiz 830 bis 1000 Windparks von der Art des Windparks Mt. Crosin errichtet werden.



Windkraftanlagen auf dem Mt. Crosin
(© Suisse Eole)

In der Surselva wird ein Windpark mit mindestens 40 Anlagen geplant. Am 29. Juni 2011 wurde an einem „Energieapéro“ in Chur das Projekt in einer Präsentation vorgestellt [RWS]. Dabei wurde behauptet, dass eine 1,5-MW-Anlage pro Jahr 3 bis 5 Millionen Kilowattstunden produzieren könne. Das entspricht einer Volllaststundenzahl von 2000 bis 3333. Der obere Wert ist jedoch völlig unrealistisch. Bisher hat keine Anlage in der Schweiz auch an sehr windexponierten Standorten mehr als 2650 Volllaststunden erreicht. Die meisten Anlagen liefern weniger als 2000 Volllaststunden [WDS].

Wer die Landschaft Surselva kennt, wird von dem Gedanken, dass diese schöne Berglandschaft durch 40 grosse Windkraftanlagen verziert werden soll, wohl kaum begeistert sein. Dabei würden diese 40 Anlagen mit einer totalen Leistung von 60 MW pro Jahr nicht mehr als 120 GWh liefern. Um die KKW-Stromproduktion zu ersetzen, müssten also in der Schweiz mehr als 200 Windparks von dieser Grösse gebaut werden.

Es gibt jedoch nur wenige Standorte in der Schweiz, die überhaupt für einen Windpark geeignet sind [SEM]. Einerseits gibt es nicht viele Regionen, in denen die mittlere Windgeschwindigkeit hinreichend hoch ist, und andererseits liegen viele dieser Regionen in nationalen Schutzgebieten. Unter Berücksichtigung der nationalen Schutzgebiete könnten bis 2035 etwa 375 Anlagen von je 2 MW gebaut werden, die pro Jahr 1500 GWh Windstrom produzieren, also nur rund 6 % der wegfallenden KKW-Produktion.

Photovoltaik-Anlagen (Siehe auch Bulletins Nr. 2 und 36)

Für die Schweiz kommen für die Stromerzeugung mit Hilfe der Solarenergie nur photovoltaische Anlagen in Frage. Solarthermische Kraftwerke können praktisch nur die direkte Sonnenstrahlung, nicht aber die diffuse Strahlung, ausnützen. Weil hier der diffuse Anteil der Strahlung im Bereich von 50 % liegt, sind sie daher ungeeignet.

Die auf der Schallschutzwand der Autobahn N13 zwischen Felsberg und Domat/Ems im Jahr 1989 montierte Photovoltaik-Anlage hat eine Länge von 830 m und eine Breite von 1,3 m. Die Anlage hat eine Nennleistung von 100 kW und liefert im Mittel 110'000 kWh pro Jahr. Sie erreicht somit 1100 Volllaststunden.

Unweit vom Windkraftwerk Mont Crosin befindet sich auf dem Mont Soleil⁶ auf einem Feld von 20'000 m² eine Photovoltaikanlage mit einer Nennleistung von 560 kW und einer totalen Solarzellenfläche von 4575 m² [WSK]⁷. Diese im Jahr 1992 erbaute Anlage liefert pro Jahr im Mittel 500'000 bis 600'000 kWh. Dies entspricht 890 bis 1070 Volllaststunden.

Auf dem Dach des „Stade de Suisse“ Wankdorf Bern wurde in den Jahren 2005 bis 2007 eine Photovoltaik-Anlage mit einer totalen Fläche von 12'000 m² errichtet. Die Anlage hat eine Nennleistung von 1300 kW und liefert im Mittel pro Jahr 1'200'000 kWh = 1,2 GWh. Sie hat also nur 920 Volllaststunden.

Um die Produktion der schweizerischen KKW zu ersetzen, müssten über 20'000 Photovoltaik-Anlagen von der Grösse des „Stade de Suisse“ erstellt werden.

An der RUMBA ERFA-Tagung⁸ [PPS] am 6. Mai 2010 wurde eine Studie über die Photovoltaik-Potenziale der Schweiz vorgestellt. Es waren folgende Annahmen gemacht worden: 1. Keine „Alpenanlagen“, 2. Keine Anlagen auf der grünen Wiese, 3. Nutzung der Siedlungsfläche, 4. Aktuell verfügbare Technologien. Unter diesen Voraussetzungen wurde gefunden, dass 100 km² Dachflächen eine für Photovoltaik-Anlagen gut geeignete Orientierung aufweisen. Diese könnten pro Jahr 9500 GWh elektrische Energie liefern, was 36,5 bis 38 % der wegfallenden KKW-Produktion entsprechen würde.

⁶ Dieser Punkt des Höhenzuges Montagne du Droit trägt den Namen „Mont Soleil“ nicht etwa wegen des Sonnenkraftwerks, sondern er heisst schon seit dem Mittelalter so.

⁷ Die hier zitierten Daten weichen geringfügig von den im Bulletin Nr. 36 genannten ab.

⁸ RUMBA: Ressourcen- und Umweltmanagement der Bundesverwaltung
ERFA: Erfahrungsaustauschgruppe

Im Jahr 2009 betrug die Produktion aller Photovoltaik-Anlagen der Schweiz 50 GWh. Wenn im Jahr 2034 die Produktion 9500 GWh erreichen sollte, würde das einer Erhöhung der Produktion um einen Faktor 190 in 25 Jahren entsprechen. Das bedeutet, dass die Produktionskapazität jedes Jahr um 23 % zunehmen müsste. Dass bis zum Jahr 2034 total 100 km² Dachflächen mit Solarzellen bedeckt werden können, ist eine sehr optimistische wenn nicht unrealistische Annahme. Die Photovoltaik-Anlage auf dem Dach des „Stade de Suisse“ hat eine Fläche von 12'000 m²; 100 km² sind dagegen 100'000'000 m², d.h. 8300-mal mehr.



Photovoltaik-Anlage auf dem Dach des „Stade de Suisse“ Wankdorf Bern
(© TRITEC AG Schweiz, Aarberg)

Geothermische Kraftwerke

Im Innern der Erde nimmt die Temperatur mit der Tiefe zu und zwar im oberflächennahen Bereich typischerweise 30 °C pro km. Diese Grösse wird *Temperaturgradient* genannt. Der Reziprokwert des Temperaturgradienten wird als *geothermische Tiefenstufe* bezeichnet und beträgt im Normalfall 33 Meter pro Grad. In geologisch aktivem Gestein (z.B. in der Nähe von Vulkanen) kann der Temperaturgradient wesentlich höher, bzw. die geothermische Tiefenstufe wesentlich kleiner sein.

Die Temperatur im Erdzentrum wird auf 5000 bis 7000 °C geschätzt. Die hohen Temperaturen im Erdinnern haben zwei Ursachen. Einerseits wurde bei der Entstehung der Erde Gravitationsenergie frei, als Staubpartikel sich zu kleinen Körpern zusammenballten und diese zu immer grösser werdenden Körpern zusammenprallten und zusammenstürzten. Dadurch wurde die Erde aufgeheizt⁹. Zu dieser Ursprungswärme zählt auch die Kristallisationswärme, die beim allmählichen Erstarren des geschmolzenen Gesteins an der Grenzfläche vom flüssigen zum festen Teil des Erdkerns frei wird. Andererseits wird durch den Zerfall langlebiger radioaktiver Isotope, Kalium-40, Thorium-232, Uran-235 und Uran-238 ständig Energie frei.

Die Wärmeflussdichte an der Erdoberfläche beträgt etwa 0,06 W/m².

⁹ Wird eine Bleikugel aus einer Höhe von 10 m auf eine Stahlplatte fallen gelassen, so wird sie beim Aufprall um 0,76 Grad erwärmt. Wenn ein grosser Meteorit auf die Erde stürzt, bewirkt die Gravitation, dass er eine Geschwindigkeit von über 11 km/s erreicht. Beim Aufprall bewirkt seine grosse kinetische Energie, dass das Material so stark erhitzt wird, dass es teilweise oder ganz verdampft.

Die im Erdinnern gespeicherte Wärme kann entweder direkt zu Heizzwecken oder indirekt zur Stromerzeugung verwendet werden. Die direkte Nutzung der oberflächennahen Erdwärme mit Hilfe von Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden ist bereits weit verbreitet. Hier interessiert jedoch nur die indirekte Erdwärmenutzung zur Stromerzeugung.

Die Geothermie wurde schon 1904 in den Thermalquellen bei Larderello in der Toscana von Graf Ginori-Conti zum ersten Mal zur Stromerzeugung eingesetzt. Während 1904 der Strom gerade für 5 Lampen ausreichte, wurde 1913 das erste Erdwärmekraftwerk in Betrieb genommen. Es lieferte 250 kW. In den folgenden Jahren wurde die Kraftwerkskapazität immer mehr ausgebaut. Heute liefern in Larderello 32 Geothermiekraftwerke eine totale Leistung von 842 MW. Larderello ist deshalb zur Nutzung der Geothermie besonders geeignet, weil das Magma sich unter der Toscana relativ nahe der Oberfläche befindet. Schon in weniger als 1000 m Tiefe ist die Temperatur der wasserführenden Schichten hoch genug, dass damit thermische Kraftwerke wirtschaftlich betrieben werden können.

Heisswasser- und Heissdampfquellen, die sich so einfach erschliessen lassen wie in Larderello, gibt es leider nur in wenigen Regionen auf der Welt. Weltweit lieferten im Jahr 2010 insgesamt 526 geothermische Kraftwerke mit einer installierten Leistung von total 10,7 GW eine jährliche Energieproduktion von 67'246 GWh. Dies entspricht einer Volllaststundenzahl von 6285.

Damit Dampfkraftwerke mit einem akzeptablen Wirkungsgrad¹⁰ betrieben werden können, sollte die Dampftemperatur mindestens 180 °C betragen. Um diese Temperatur zu erreichen, müsste bei einer geothermischen Tiefenstufe von 33 m pro Grad in thermisch nichtaktivem Gestein bis in eine Tiefe von über 5200 m gebohrt werden.

Wenn das aus dem Untergrund gewonnene Wasser eine Temperatur von unter 180 °C hat, werden binäre Verfahren eingesetzt. Das heisse Wasser gibt in einem Wärmetauscher die Wärme an den Dampfkreislauf der Turbine ab. Beim *Organic Rankine Cycle* (ORC) ist das Arbeitsmedium der Turbine eine organische Flüssigkeit mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur. Beim Kalina-Kreisprozess wird ein Ammoniak-Wasser-Gemisch verwendet. Anlagen, die mit dem Kalina-Prozess arbeiten, erreichen einen etwas höheren Wirkungsgrad als ORC-Anlagen, aber sind auch teurer.

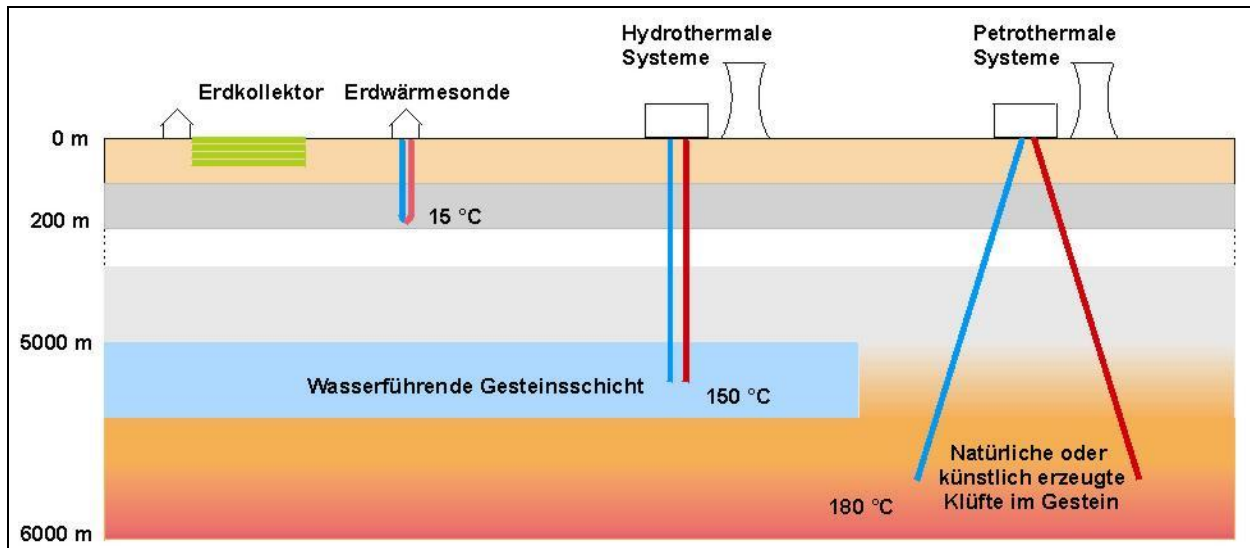
Der zweite Hauptsatz¹¹ lässt sich jedoch auch mit binären Anlagen nicht überlisten. Die relativ tiefen Primär-Temperaturen bedingen einen niedrigen Wirkungsgrad. Bei 180 °C beträgt der erreichbare Wirkungsgrad etwa 13 % und bei 140 °C noch etwa 10 %. Ein Wirkungsgrad von nur 10 % hat neben hohen Investitions- und Kapitalkosten unter anderem zur Folge, dass ein geothermisches Kraftwerk, das eine elektrische Leistung von 220 MW hat, eine gleich grosse Abwärme entwickelt und also einen gleich grossen Kühlturm benötigt wie ein Kernkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1000 MW. Auch für eine Wassertemperatur von 140 °C müsste noch rund 4000 m tief gebohrt werden.

Es wird zwischen hydrothermalen und petrothermalen Systemen unterschieden. Bei hydrothermalen Systemen wird eine wasserführende Schicht angebohrt. Das heisse Wasser wird dem Kraftwerk zugeführt und das abgekühlte Wasser wird wieder in die wasserführende Schicht zurückgepumpt. Bei petrothermalen Systemen werden in der angebohrten Gesteinsschicht durch Einpressen von Wasser mit einem Druck von bis zu 150 bar vorhandene Risse im Gestein aufgeweitet und neue Risse gebildet. Sodann wird durch ein Bohrloch Wasser in diese Gesteinsschicht eingeleitet und durch ein in einiger Entfernung angebrachtes zweites Bohrloch wird das erwärmte Wasser entnommen. Bei dieser Methode, die auch als Hot-Dry-Rock-Verfahren bezeichnet wird, besteht jedoch eine gewisse Gefahr, dass Erdbeben ausgelöst werden, wie das Basler Geothermie-Projekt im Dezember 2006 drastisch demonstriert hat.

¹⁰ Auch wenn bei einem geothermischen Kraftwerk keine „Brennstoffkosten“ entstehen, spielt der Wirkungsgrad trotzdem eine Rolle. Ein niedrigerer Wirkungsgrad bedeutet, dass für eine bestimmte Nutzleistung ein grösseres Kraftwerk gebaut werden muss, was höhere Investitionskosten und damit höhere Kapitalkosten zur Folge hat.

¹¹ Siehe Bulletin Nr. 63.

Durch die Wärmeentnahme wird das Gestein abgekühlt. Eine 1 km^3 grosse Gesteinsschicht, der Wärme entnommen wird für die Produktion einer elektrischen Leistung von 10 MW, kühlt sich in 20 Jahren um $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ab¹². Es wird mit einer Nutzungsdauer von 25 Jahren pro Reservoir gerechnet. Nach dieser Betriebszeit muss also jeweils eine neue Gesteinsschicht erschlossen werden. Um die 3250 MW der schweizerischen KKW's durch geothermische Kraftwerke zu ersetzen, müssten somit rund 325 geeignete Gesteinsbereiche von der Grösse 1 km^3 immer wieder neu gefunden werden. Zwar würde sich nach der Wärmeentnahme das Gestein allmählich wieder erwärmen, aber dies würde mehrere tausend Jahre beanspruchen.



Nutzung der Erdwärme mit Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, hydrothermalen und petrothermalen Systemen

Falls in der Schweiz das Erdbeben-Risiko des Hot-Dry-Rock-Verfahrens zu gross ist, kommen offenbar nur hydrothermale Systeme in Frage. Dabei besteht jedoch immer die Unsicherheit, ob in der erforderlichen Tiefe überhaupt eine wasserführende Schicht gefunden wird.

Im Gegensatz zu Wind- und Photovoltaik-Kraftwerken haben geothermische Kraftwerke den grossen Vorteil, dass sie unabhängig von der Witterung und der Jahreszeit ständig eine praktisch konstante Leistung liefern können und dementsprechend eine hohe Volllaststundenzahl erreichen.

Das theoretisch langfristig erschliessbare Potenzial der Geothermie in der Schweiz wird auf etwa 17'000 GWh pro Jahr geschätzt [SGS]. Das realisierbare Potenzial der Geothermie zur Stromerzeugung ist jedoch noch sehr ungewiss, und die technische Nutzbarkeit ist noch keineswegs gesichert. Experten erwarten, dass bis 2030 rund ein Dutzend Anlagen gebaut werden könnten, die pro Jahr total 800 GWh produzieren würden [BFE].

Biomasse-Kraftwerke

Die Nutzung der Biomasse zur Stromerzeugung konzentriert sich in der Schweiz auf die Verwertung von Abfällen und Kehrlicht. Diese Nutzung ist energetisch und ökologisch sinnvoll, aber auch schon teilweise ausgeschöpft. Ein Anbau von Energiepflanzen wäre dagegen ökologisch höchst fragwürdig und sollte nicht in Betracht gezogen werden. Das realistische Potenzial der

¹² Sogar unter den an sich idealen Bedingungen von Larderello wurde festgestellt, dass die Wärmeentnahme zu einer Abkühlung führt. Seit 1950 hat der Dampfdruck um 30 % abgenommen.

zusätzlichen Stromerzeugung aus Biomasse (inklusive Kehricht) ist in der Schweiz auf etwa 1700 GWh pro Jahr beschränkt [EES].



Bioenergieanlage Bätterkinden (© sol-E Suisse AG, Bern)

Total

Es ergeben sich also folgende Potentiale:

Wasserkraftwerke (Ausbau)	5'400 GWh
Windkraft-Anlagen	1'500 GWh
Photovoltaik-Anlagen	9'500 GWh
Geothermische Kraftwerke	800 GWh
Biomasse-Kraftwerke (Ausbau)	1'700 GWh
Total	18'900 GWh

Selbst bei optimistischen Schätzungen liefern also die erneuerbaren Energien nur 18'900 der durch die Stilllegung der KKW wegfallenden 25'000 bis 26'000 GWh. Die fehlenden 6'100 bis 7'100 GWh müssten somit von Gas- oder Gas-und-Dampf-Kraftwerken (GuD-Kraftwerke) geliefert werden.

Energiespeicherproblem

Selbst wenn die Energieproduktion der Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen zusammen mit den Wasser- und Biomasse-Kraftwerken hinreichend wäre, ist das Energieversorgungsproblem noch nicht gelöst. Da die Leistungen der Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen stark fluktuieren und nachts und bei Windstille gleich null sind, müssen Energiespeicher zur Verfügung stehen.

Die schweizerischen Kernkraftwerke liefern Bandenergie mit einer Leistung von 3,26 GW. Durch den Ausbau der Wasser- und Biomasse-Kraftwerke und durch die geothermischen Kraftwerke und die Gas- oder GuD-Kraftwerke könnten 1,71 GW dauernd produziert werden ($5'400 + 1'700 + 800 + 7'100 \text{ GWh} = 15'000 \text{ GWh}$; $15'000 \text{ GWh} / 8760 \text{ h} = 1,71 \text{ GW}$). Die rest-

lichen 1,55 GW müssten von den Windkraft- und den Photovoltaik-Anlagen produziert werden. Diese liefern aber – wie schon gesagt – bei Windstille, bzw. bei Nebel oder bedecktem Himmel und nachts wenig oder gar nichts, dafür bei optimalen Bedingungen eine bis zu zehnmal grössere Leistung, die dann irgendwie gespeichert werden muss.

Grundsätzlich sind die in der folgenden Tabelle dargestellten Arten der Speicherung elektrischer Energie möglich.

Speicherung elektrischer Energie		
Mechanisch	Chemisch	Direkt
Pumpspeicherwerke	Wasserstoff	Kondensatoren
Druckluftspeicher	Akkumulatoren	Supraleiter
Schwungräder		

Bei tagelangen Wetterlagen mit Nebel oder stark bedecktem Himmel und Windstille müssen Energien in der Grössenordnung von 500 bis 1000 GWh gespeichert werden können. Dafür kommen praktisch nur Wasserstoff und Pumpspeicherwerke in Frage.

Mit dem zeitweisen Überangebot von Solar- und Windstrom könnte aus Wasser durch Elektrolyse Wasserstoff produziert werden, der dann bei Bedarf als Brennstoff für ein Gas- oder GuD-Kraftwerk dienen würde. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse liegt zwischen 70 und 90 %, und Gaskraftwerke haben einen Wirkungsgrad von etwa 40 %, während GuD-Kraftwerke bis zu 60 % erreichen. Der ganze Zyklus arbeitet daher mit einem Wirkungsgrad zwischen etwa 30 und 50 %. Damit würden die Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen im Mittel zwei- bis dreimal weniger Energie liefern als in der Tabelle auf Seite 11 angenommen.

In einem Pumpspeicherkraftwerk wird bei einem Stromüberangebot Wasser von einem Speicherbecken im Tal durch eine Druckleitung in ein höher gelegenes Speicherbecken gepumpt. Bei Bedarf wird wieder Strom produziert, indem das Wasser vom höheren Speicherbecken durch die gleiche Druckleitung dem Kraftwerk im Tal zugeführt wird. Bei diesem Zyklus werden Wirkungsgrade zwischen 70 und 80 % erreicht.

Im oberen Puschlav soll ein Pumpspeicherkraftwerk zwischen dem Lago Bianco und dem Lago di Poschiavo gebaut werden. Die nutzbare Höhendifferenz beträgt 1250 m und als installierte Leistung ist 1000 MW geplant. Das Stauvolumen des Lago Bianco wird um 8 Millionen m³ auf 26 Millionen m³ erhöht. Wenn – was natürlich nicht zulässig ist – das ganze Stauvolumen des Lago Bianco ausgenützt würde, könnte das Kraftwerk 1 GW während rund 71 Stunden liefern.

Beim Ausbauprojekt Linthal 2015 der Kraftwerke Linth-Limmern wird zwischen dem Limmernsee und dem Muttsee ein Pumpspeicherkraftwerk mit einer Leistung von 1000 MW gebaut. Die Höhendifferenz beträgt rund 600 m. Wenn das ganze Stauvolumen des Muttsees, das von 8 auf 25 Millionen m³ erhöht wird, ausgenützt werden könnte, würde das Kraftwerk 1 GW während knapp 33 Stunden liefern.

Um während 20 Tagen mit Windstille und bedecktem Himmel 1,55 GW zu liefern, müssten mehr als 10 Pumpspeicherkraftwerke von der Grösse des Projekts Lago Bianco zur Verfügung stehen. Da die total abgegebene Spitzenleistung der Solar- und Windkraftwerke bis über 10 GW betragen kann, müssten auch aus diesem Grund mindestens 10 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Leistung von je 1000 MW bereit stehen. Es ist kaum anzunehmen, dass in der Schweiz noch 10 oder mehr so grosse Pumpspeicherkraftwerke gebaut werden können.

Dass es bei fehlender Bandenergie trotz grosser Nennleistungen von Solar- und Windkraftwerken zu Stromengpässen kommen kann, weil hinreichende Speichermöglichkeiten fehlen, wird sich demnächst in Deutschland zeigen. In Deutschland wurden nach dem Atomunfall in Japan 8 der 17 deutschen Kernkraftwerke stillgelegt. Die noch in Betrieb stehenden KKW haben eine Nennleistung von total 12,7 GW (brutto). Dagegen beträgt die Nennleistung der 2010 installierten Photovoltaik-Anlagen 17,4 GW und die der 2009 installierten Windkraftanlagen 25,8 GW.

Die Nennleistung der Solar- und Windkraftwerke zusammen ist also bereits 3,4-mal grösser als die Nennleistung der noch in Betrieb stehenden Kernkraftwerke. Trotzdem warnten schon im Sommer Netzbetreiber und die Bundesnetzagentur, dass es an kalten Wintertagen bei Windstille und starker Bewölkung zu Engpässen in der deutschen Stromversorgung kommen könnte, weil die Reservekapazitäten fehlen, die unter anderem durch die KKW zur Verfügung standen. Es wurde daher gefordert, dass eines der abgeschalteten Kernkraftwerke als Reserve in Betriebsbereitschaft gehalten werde, was wie zu erwarten auf Widerspruch stiess. Stattdessen wurde vorgeschlagen, ein Steinkohlekraftwerk wieder in Betrieb zu nehmen. Es lässt sich darüber streiten, welche Lösung umweltfreundlicher ist.

Netzregelung und Netzstabilität

Ein weiteres Problem ist die Netzregelung und die Gewährleistung der Netzstabilität. Weil elektrische Energie sich nicht in grösseren Mengen direkt speichern lässt, muss in jedem Moment genau so viel Strom produziert werden, wie gerade gebraucht wird.

Wenn die einem Wechselstromgenerator entnommene Leistung erhöht wird, sinkt zunächst seine Drehzahl und damit die Netzfrequenz unter den Sollwert von 50 Hertz. Wenn dagegen die Last abnimmt, steigt die Frequenz über 50 Hz. Im Verbundnetz der europäischen Länder darf die Frequenz um nicht mehr als 0,05 Hz vom Sollwert abweichen, damit nicht die Funktion zahlreicher elektrischer Geräte beeinträchtigt wird. Bei Laständerungen muss daher die Regelung sofort eingreifen, um die Frequenz wieder auf den Sollwert zu bringen.

Die Regelung geschieht in 3 Regelstufen. Die Primärregelung reagiert automatisch innerhalb von Sekunden. Bei einer Lasterhöhung werden die Turbinenventile etwas mehr geöffnet, wodurch das auf den Generator wirkende Drehmoment vergrössert wird und die Drehzahl des Generators sich wieder erhöht. Analog werden bei einer Lastreduktion die Turbinenventile etwas zugezogen, das Drehmoment auf den Generator verkleinert und seine Drehzahl reduziert.

In Wirklichkeit enthält das Verbundnetz selbstverständlich nicht nur einen Verbraucher und ein Kraftwerk, sondern eine sehr grosse Zahl von Verbrauchern und auch eine grosse Zahl von Kraftwerken, was das Ganze natürlich etwas komplizierter macht.

Die Schwankungen der Strombezüge der einzelnen Verbraucher gleichen sich im Mittel etwas aus, so dass die relativen Lastschwankungen kleiner sind als bei einem einzelnen Verbraucher. Trotzdem kommt es zu Schwankungen des Strombedarfs, die zum Teil planbar sind und zum Teil aber auch nicht. Die planbaren Schwankungen sind abhängig von der Tageszeit („Kochspitzen“, Betriebszeiten der Industrie usw.), vom Wochentag (Werktag/Wochenende), von Ferien, Jahreszeiten, Aussentemperaturen usw. Hinzu kommen nichtplanbare Schwankungen des Bedarfs oder auch der Produktion durch besondere Ereignisse (Ausfall eines Grossverbrauchers oder eines Kraftwerks) oder Wetterverhältnisse.

Die Netzbetreiber der UCTE-Mitgliedstaaten¹³ müssen zwischen 1,5 und 5 % der Kraftwerksleistung als Primärregelreserve innerhalb von 30 Sekunden bereithalten. Dabei sind nicht alle Kraftwerke an dieser Regelung beteiligt.

Die Primärregelung ist begrenzt und muss sofort entlastet werden, damit sie bei Bedarf erneut eingesetzt werden kann. Dazu dient die Sekundärregelung, die ebenfalls automatisch arbeitet und die Primärregelung innerhalb weniger Minuten ablöst. Sie setzt zusätzliche Kraftwerkskapazitäten ein, die schnell hochgefahren werden können. Dafür sind Speicherkraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke und Gasturbinenkraftwerke geeignet.

Wenn die Sekundärregelung länger beansprucht wird oder nicht ausreicht, kommt die automatisch oder manuell aktivierte Tertiärregelung oder Minutenreserve zum Einsatz, indem weitere Kraftwerke hochgefahren werden.

¹³ UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity,
Union für die Koordination des Transports von Elektrizität

Im Extremfall muss ein drohender Zusammenbruch des Verbundnetzes durch einen Lastabwurf, d.h. durch Abschalten von Netzteilen, verhindert werden.

Die keineswegs einfache Aufgabe, das Stromnetz trotz aller Schwankungen stabil zu halten, wird nun stark erschwert, wenn der Anteil von Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen an der Stromproduktion immer mehr erhöht wird. Erstens können diese Kraftwerke wegen ihrer unzuverlässigen Stromproduktion nicht als Regel- oder Reservekraftwerke dienen, und zweitens verschärfen sie sogar das Regelproblem wegen ihrer stark schwankenden Stromproduktion. Je grösser der relative Anteil der Stromproduktion der Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen ist, desto schwieriger wird das Regelproblem. Wenn beispielsweise ein ganzer Offshore-Windpark von 1000 MW infolge einer Flaute plötzlich ausfällt, muss ein „Schattenkraftwerk“ gleicher Leistung als Reserve bereit stehen, damit das Netz nicht zusammenbricht. Ein solches Reservekraftwerk, das im Stand-by-Zustand bereitgehalten wird, arbeitet in einem höchst ungünstigen Betriebszustand und völlig unwirtschaftlich. Wenn es ein konventionell gefeuertes Kraftwerk ist, produziert es dabei eine unverhältnismässig grosse Menge CO₂ (und anderer Schadstoffe), ohne wesentliche Mengen Strom zu liefern.

Wenn der Anteil der stark und möglicherweise rasch fluktuierenden Stromproduktion einen gewissen Prozentsatz der Gesamtstromproduktion überschreitet, wird die Netzstabilität gefährdet und es kann zu regionalen oder gar überregionalen Netzzusammenbrüchen kommen.

Genau so problematisch wie eine Überlastung des Netzes infolge des Ausfalls der Produktion von Solar- oder Windkraftwerken ist eine Überproduktion dieser Werke. Durch das Schweizerische Energiegesetz (Art. 7a) sind die Netzbetreiber verpflichtet, die gesamte Elektrizität, die aus Neuanlagen durch die Nutzung von Sonnenenergie, Geothermie, Windenergie, Wasserkraft bis zu 10 MW, sowie Biomasse und Abfällen aus Biomasse gewonnen wird, in einer für das Netz geeigneten Form abzunehmen – auch wenn sie infolge eines momentanen Überangebots an Strom gar nicht benötigt wird. Wenn die überschüssig produzierte elektrische Energie in der näheren Umgebung nicht gebraucht werden kann, muss sie über grössere Distanzen transportiert werden, oder es müssen andere Kraftwerke heruntergefahren werden.

Das elektrische Verbundnetz wurde aber nicht dafür dimensioniert, grössere Energiemengen über den halben oder ganzen Kontinent zu transportieren. Wenn immer grössere Energieströme von einem Land in das andere fliessen, kommt das Netz bald an seine Kapazitätsgrenzen. Der grosse Stromausfall in Italien am 28. September 2003 war letzten Endes darauf zurückzuführen, dass Italien unverhältnismässig grosse Strommengen importierte und das Netz dicht an seinen Sicherheitsgrenzen betrieben wurde.

Wenn der prozentuale Anteil der nicht programmierbaren regenerativen Energien stark zunimmt und der längst fällige Ausbau des Stromnetzes weiter verzögert oder ganz unterlassen wird, könnten in Zukunft grosse Stromausfälle häufig auftreten.

Anhang

Da Energie und Leistung und ihre Einheiten immer wieder verwechselt werden, wird hier eine kleine Übersicht zusammengestellt.

Energie

Damit ein elektrischer Motor Arbeit verrichten kann, z.B. in einem Kran eine Last auf eine bestimmte Höhe heben kann, muss ihm elektrische Energie zugeführt werden. Wenn eine Heizung oder ein Kochherd eine gewisse Wärmemenge (siehe Bulletin Nr. 63, Anhang) abgeben soll, muss der Heizung oder dem Herd eine entsprechende elektrische Energie zugeführt werden. Auch eine Lampe, die während einer bestimmten Zeitdauer in Betrieb ist, braucht eine entsprechende elektrische Energie.

Leistung

Leistung ist (abgegebene oder aufgenommene) Energie oder Arbeit pro Zeiteinheit. Umgekehrt ist bei konstanter Leistung die in einem Zeitintervall abgegebene oder aufgenommene Energie oder Arbeit gleich der Leistung mal die Zeitdauer.

Einheiten

Energie, Arbeit oder Wärme wird in Joule (J) gemessen. Die Einheit für die Leistung ist dementsprechend Joule pro Sekunde (J/s). Diese Einheit wird auch Watt (W) genannt.

Da $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$, ist $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ s} = 1 \text{ Ws}$. Somit ist 1 Joule gleich 1 Watt mal 1 Sekunde oder 1 Wattsekunde. Als Energieeinheiten können daher auch die Einheiten Wattsekunden (Ws) und Wattstunden (Wh) verwendet werden. Im Alltag wird meist die Einheit Kilowattstunde (kWh) gebraucht.

Umrechnungen

$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ $1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW}$ $1 \text{ GW} = 1000 \text{ MW} = 1'000'000 \text{ kW}$

$1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$

$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$

$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3'600'000 \text{ J}$

$1 \text{ MWh} = 1000 \text{ kWh}$

$1 \text{ GWh} = 1000 \text{ MWh} = 1'000'000 \text{ kWh}$

Blödsinn

kW/h Watt pro Stunde Megawatt pro Jahr kWh Stunden

(Leider keine erfundenen, sondern in der Literatur gefundene Beispiele!)

Quellen:

- APW Ausbaupotenzial der Wasserkraft, Bundesamt für Energie 2004.
<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/2663.pdf>
- BFE Bundesamt für Energie
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00501/index.html?lang=de>
- EES Erneuerbare Energien Schweiz
<http://www.stromzukunft.ch/erneuerbare-energien/energien/>
- PPS Photovoltaik-Potenziale Schweiz / EU
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_641855796.pdf&endung=Photovoltaik-Potenziale%20Schweiz%20/%20EU
- PVL Photovoltaik in Deutschland
<http://www.sma.de/de/news-infos/pv-leistung-in-deutschland.html>
- RWS Regionaler Windpark Surselva, altaventa AG 2011
http://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/aev/dokumentation/EnergieeffizienzEnergieaperoDokument_e/EA68_Amfeld.pdf
- SEM Ein Land mit Potenzial, Suisse Eole Medienstelle
http://www.suisse-eole.ch/uploads/media/Infoblatt_Potenzial.pdf
- SGS Strom aus Geothermie in der Schweiz
http://www.geothermie.ch/data/dokumente/miscellanusPDF/Strom_aus_Geothermie_CH_v1.pdf
- WDS Windenergie-Daten der Schweiz 2011
<http://www.wind-data.ch/wka/wka.php?wka=MTC>
- WSK Wissenswertes zum Solarkraftwerk, Gesellschaft Mont-Soleil 2011
<https://societe-mont-soleil.ch/solarkraftwerk-wissen.html>

Wasserkraft

<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/2663.pdf>

Windkraft

http://www.buerger-fuer-technik.de/Windkraft_und_die_Folgen_K-H_Schmidt_11.01.11.pdf

<http://www.immergenugstrom.ch/contents/windenergie>

<http://www.neueenergie.net/index.php?id=1814#>

<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/18670.pdf>

<http://www.robertmelchner.de/Windenergie.htm>

http://www.suisse-eole.ch/uploads/media/Infoblatt_Potenzial.pdf
<http://www.suisse-eole.ch/uploads/media/Faktenblatt-Windenergie070411.pdf>
http://www.solesuisse.ch/de/Portaldata/1/Resources/sol-e/pdf-dateien/fachtagung_windenergie/2_Praesentationen_Aemter_Kanton_Graubunden.pdf
<http://www.suisse-eole.ch/fileadmin/PDF/Publications/guetsch.pdf>
<http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-52637606.html>
<http://www.stadt-zuerich.ch/ewz/de/index/ewz/medien/2011/allgemein/windpark-surselva--altaventa-plant-zusammenarbeit-mit-ewz-.html>
<http://www.wind-data.ch/wka>
<http://www.windland.ch/wordpress>

Photovoltaik

http://energieberatung.ibs-hlk.de/plansol_pv.htm
<http://lightbucket.wordpress.com/2008/02/24/insolation-and-a-solar-panels-true-power-output/>
<http://photovoltaikversicherung.wordpress.com/2007/07/18/feuerwehrleute-unter-strom-photovoltaik-neue-gefahr/>
<http://wohnen.pege.org/2005-photovoltaik/temperaturkoeffizient.htm>
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_41831238.PDF
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_189528294.pdf&endung=RUMBA%20ERFA-Tagung%202010%20%-20Entscheidungsgrundlagen%20f%FCr%20den%20Bau%20von%20Solaranlagen
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_641855796.pdf&endung=Photovoltaik-Potenziale%20Schweiz%20/%20EU
http://www.bkw-fmb.ch/bkwfmb/de/home/thema_energie_und/Energieproduktion/Sonne/stade_de_suisse.html
<http://www.enprimus.de/177.html>
<http://www.immergenugstrom.ch/contents/alternativ-energien>
<http://www.photovoltaik-web.de/in-betrieb/brand-feuer-loeschen.html>
<http://www.solarserver.de/news/news-10929.html>
<http://www.ub-feuerwehr.de/br%C3%A4nde-photovoltaik-anlagen>
<http://www.welt.de/print/wams/vermishtes/article13450583/Der-grosse-Solarschwindel.html>

Geothermie

<http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermie>
http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermiekraftwerk_Landau
http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermiekraftwerk_Neustadt-Glewe
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kalina-Kreisprozess>
http://de.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_Cycle
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00501/index.html?lang=de>
<http://www.energie debate.ch/wp-content/uploads/2011/05/Geothermie.pdf>
<http://www.energiestiftung.ch/files/downloads/energiethemen-erneuerbareenergien-umweltwaerme-geothermie/geothermischer-ressourcenatlas-schweiz-12-2004.pdf>
http://www.geothermie.ch/data/dokumente/miscellanusPDF/BFE_Geothermie_Deutsch.pdf
<http://www.geothermal.ch/fileadmin/docs/downloads/egs061207.pdf>
<http://www.geothermie.ch/index.php?p=geothermics>
<http://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen/weltweit.html>
<http://www.geothermie.de/wissenswelt/archiv/deutsch/hoellenfeuer-und-high-tech-larderello-geschichtstraechtiger-geothermischer-strom.html>
<http://www.geothermie.stadt.sg.ch/projekt/>
http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_20_erdwaerme.pdf
http://www.nuklearforum.ch/upl/files/Geothermie_dt.pdf
<http://www.seismo2009.ethz.ch/basel/index.php?m1=project&m2=dhm#einfuehrung>
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,589944,00.html>
<http://www.tiefengeothermie.de/index.php?id=laenderreports>
[http://www.tiefengeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews\[pS\]=1315057518&tx_ttnews\[pointer\]=5&tx_ttnews\[tt_news\]=317&tx_ttnews\[backPid\]=54&cHash=17049b55de](http://www.tiefengeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews[pS]=1315057518&tx_ttnews[pointer]=5&tx_ttnews[tt_news]=317&tx_ttnews[backPid]=54&cHash=17049b55de)
<http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB112-002.htm>
http://www.vgka.ch/fileadmin/user_upload/vgka/aktuelles/20110519_Mediengespraech.pdf

Biomasse

<http://www.energie debate.ch/wp-content/uploads/2011/05/Biomasse.pdf>
 Druckfehler: 3000 GWh/Jahr, nicht 3000 MWh/Jahr
http://www.landi.ch/deu/news-artikel_299472.aspx
<http://www.stromzukunft.ch/erneuerbare-energien/energien/>

Bilder

<http://www.bed-and-breakfast-meiringen.ch/FOTOS.php?view=preview&image=5&category=0#>
<http://www.suisse-eole.ch/de/infotehk/fotogalerie/mont-crosin.html>
<http://www.tritec-energy.com/de/referenzanlagen/1001-fussballstadion-stade-de-suisse-bern/>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik>
<http://www.bkoag.ch/Anlagen-Referenzen/Vergaerbare-Biomasse/Bioenergieanlage-Baetterkinder.aspx>