

Ausstieg aus der Atomkraft

3 Szenarien im Vergleich

Ein rascher Ausstieg aus der Atomkraft ist technisch machbar, ökonomisch vorteilhaft und ohne neue Gaskraftwerke oder namhafte CO₂-Steigerung umsetzbar.



Jan Remund, dipl. Natw. ETH,
Fachverantwortlicher Sonnenenergie Meteotest

Mai 2011



Abstract

Die Studie untersucht drei Ausstiegsszenarien für die Schweiz:

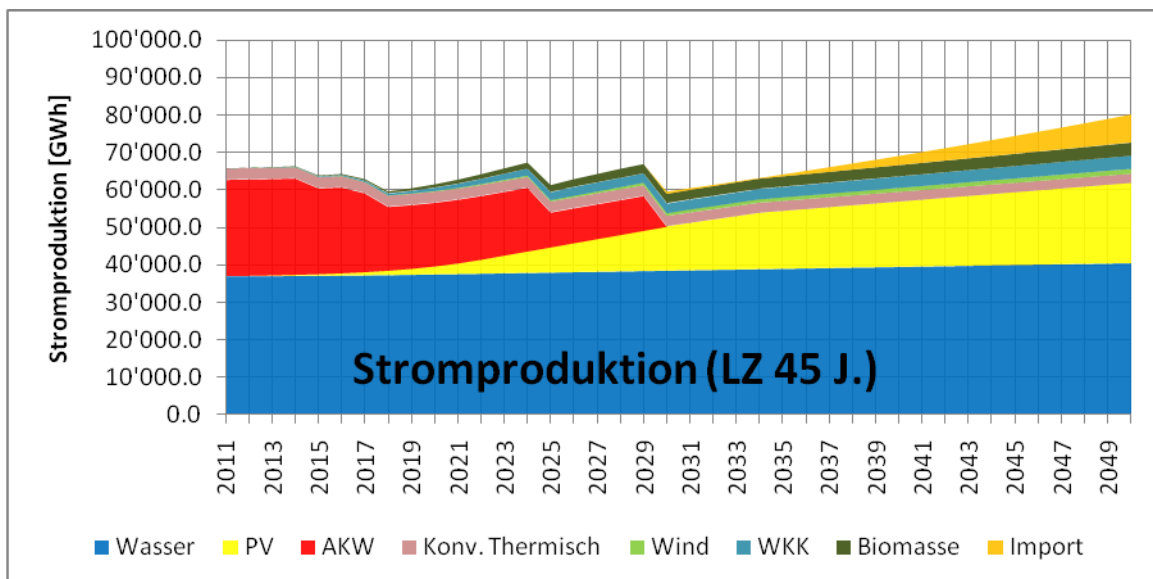
| | |
|-------------|---|
| Szenario 1: | AKW-Laufzeiten 40 Jahre, Förderung Erneuerbare und Solarstrom, Nachfragedämpfung |
| Szenario 2: | AKW-Laufzeit 45 Jahre, Förderung Erneuerbare und Solarstrom, Nachfragedämpfung |
| Szenario 3: | AKW-Laufzeit 50 Jahre und Bau eines neuen AKW, Förderung Erneuerbare und mässige Förderung Solarstrom |

Die Untersuchung umfasst nur den Stromsektor. In Szenario 1 und 2 geht sie von verstärkten Effizienzmassnahmen aus, weshalb sie den Stromverbrauch zwischen 2011 und 2030 als konstant betrachtet. Ab 2031 wird mit einem Mehrverbrauch von 1.5% pro Jahr gerechnet. In Szenario 3 wird mit einer konstanten Zunahme von 1% gerechnet.

Szenario 2 ist am besten

Betrachten wir die Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 1 und 2 (Abbildung unten), zeigt sich, dass die bestehenden AKW problemlos abgeschaltet werden können. Die Lücke kann mit Solarstrom geschlossen und mit Effizienzmassnahmen gedrosselt werden. Photovoltaik (PV) hat eindeutig das grösste Potenzial, weshalb die rasche Aufhebung des Deckels in der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) unabdingbar ist. Wind, zusätzliche Wasserkraftwerke und Wärmekraftkoppelung (WKK) sind wichtig, im Verhältnis zu Solarstrom aber nur die „Beilage“. Der verzögerte Ausbau der Windkraft wegen Einsparungen fällt nicht ins Gewicht.

Die Studie zeigt, dass der Bau von Gaskraftwerken unnötig ist. Gaskraftwerke sind vor allem beim Einsatz im Mittel- und Spitzenlastbereich attraktiv, als Grundlastkraftwerke sind sie zu teuer. Der Mittel- und Spitzenlastbereich wird in der Schweiz durch Wasserkraft genügend abgedeckt. Der Gaspreis wird in Zukunft steigen, was Gaskraftwerke auch ohne CO₂-Kompensation unrentabel machen wird.



Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 2 (Laufzeit (LZ) 45 Jahre)

Die Lücke wird mit Szenario 3 eindeutig grösser, weil Solarstrom nur mässig und Effizienzmassnahmen ungenügend gefördert werden.

Strom-Mix 2050: 50% Wasserkraft und 25% Solarstrom

Die Stromproduktion 2050 gemäss Szenario 1 und 2 wird grösstenteils durch Wasserkraft getragen (46%). Das Ausbaupotenzial beträgt 4%. PV wird 27% ausmachen. Dazu müssten in der Schweiz rund ein Viertel aller Dächer mit PV ausgestattet sein. Landwirtschaftliche Freiflächen oder Anlagen auf Lawinenverbauungen oder über Parkplätzen stellen ein weiteres unausgeschöpftes Potenzial dar. Die übrigen Stromanteile sind sehr tief, als Gesamtes aber wichtig: WKK 5%, Biomasse 4%, Wind 2%.

Für einen Ausstieg aus der Atomkraft im Jahr 2029 gemäss Szenario 2 müssten allerdings noch nicht die ganzen Potenziale umgesetzt werden. Für das Jahr 2029 rechnet die Studie mit rund 11 TWh PV, was rund einem Achtel der Dachflächen entspricht.

Strom ohne Atom ist bezahlbar

Mit den Szenarien 1 und 2 kostet der Atomausstieg einen Haushalt im Jahr 2050 zusätzlich 4 Rappen pro kWh. Das entspricht rund 120 Franken pro Jahr und ist absolut tragbar. Der Ausbau von PV-Anlagen in den nächsten 40 Jahren wird ein Investitionsvolumen von 41 Mrd. Franken auslösen. Rund die Hälfte davon wird in der Schweiz anfallen. Mit Szenario 3 würden lediglich 15 Mrd. Investitionen im Inland getätigt.

Stromversorgung ohne Atom ist sicher

Die Kombination von rund 50% Wasserkraft und 25% PV ergänzen sich gut. Die Speicherkraftwerke können die Schwankung von PV gut ausgleichen. PV-Anlagen produzieren am Tag, wenn der Bedarf am grössten ist. Die hohe Variabilität der Sonneneinstrahlung kann ausgeglichen werden und die sichere Versorgung ist gewährleistet. Ein Ausbau der Speicherkapazität (saisonal und tageszeitlich) im Inland ist erst in 10 Jahren nötig.

Fazit:

- Der AKW-Ausstieg ist mit einfachen politischen Massnahmen machbar: Die starke Förderung von PV und Effizienzmassnahmen sind dabei zentral.
- Grosse Stromkonzerne wehren sich aus betriebswirtschaftlichen Gründen gegen den massiven Ausbau von dezentralem Solarstrom, der nicht von wenigen Grossen, sondern von vielen Kleinen produziert würde.

Einleitung

Nach dem AKW-Unfall in Fukushima werden viele Zahlen und Meinungen herum geboten, wie und ob der Ausstieg aus der Atomkraft machbar ist. In dieser Studie werden 3 Ausstiegs-Szenarien auf Grund von aktuellsten Zahlen zu den Erneuerbaren für die Schweiz untersucht:

1. AKW Laufzeiten von 40 Jahren, Förderung Erneuerbare und Solarstrom und Nachfragedämpfung („PV / LZ 40 J.“) (Abstimmung im Jahr 2015),
2. AKW Laufzeiten von 45 Jahren, Förderung Erneuerbare und Solarstrom und Nachfragedämpfung („PV / LZ 45 J.“),
3. AKW Laufzeiten von 50 Jahren und Bau eines neuen AKW, Förderung von Erneuerbaren und mässige Förderung Solarstrom („AKW / LZ 50 J.“). In diesem Szenario würde das letzte AKW 2075 abgestellt.

Bei der Untersuchung werden besonders auch die Kosten, der CO₂-Ausstoss und die Umsetzbarkeit der Varianten analysiert. Der Zeithorizont der Untersuchung entspricht den 40 Jahren 2011 – 2050. Die Untersuchung umfasst nur den Stromsektor. Ausländische Beteiligungen (AKW, Wind, Solar und konventionelle thermische Kraftwerke) werden nicht berücksichtigt.

Annahmen

Die Wahl der Annahmen ist der kritischste Punkt von Studien dieser Art. Die Annahmen wurden möglichst objektiv getroffen und sind eher konservativ.

Die an der Nachhaltigkeit orientierten Szenarien 1 und 2 gehen davon aus, dass gleichzeitig verstärkte Effizienzmassnahmen ergriffen werden. Der Stromverbrauch im Jahr 2010 (59.6 TWh) wird dadurch von 2011 bis 2030 konstant gehalten. Ähnlich Annahmen wurden auch in der FVEE- Studie verwendet (FVEE, 2010). Ab 2031 wird ein Mehrverbrauch von 1.5% pro Jahr angenommen (Grund für Zunahme: Umlagerung aus fossilen Energien wie z.B. dem Verkehr). Das Szenario mag angesichts des Einsparpotenzials von 30% recht tief angesetzt sein (Infras und TNC, 2010). Politisch wird es aber schwierig sein, sehr grosse Anteile zu senken. Gründe dafür sind die Preiselastizität beim Strom und die Umlagerung von fossilen Energieträgern auf Strom. Beim Szenario 3 (AKW) wird eine konstante Zunahme von 1% angenommen (Abb. 1).

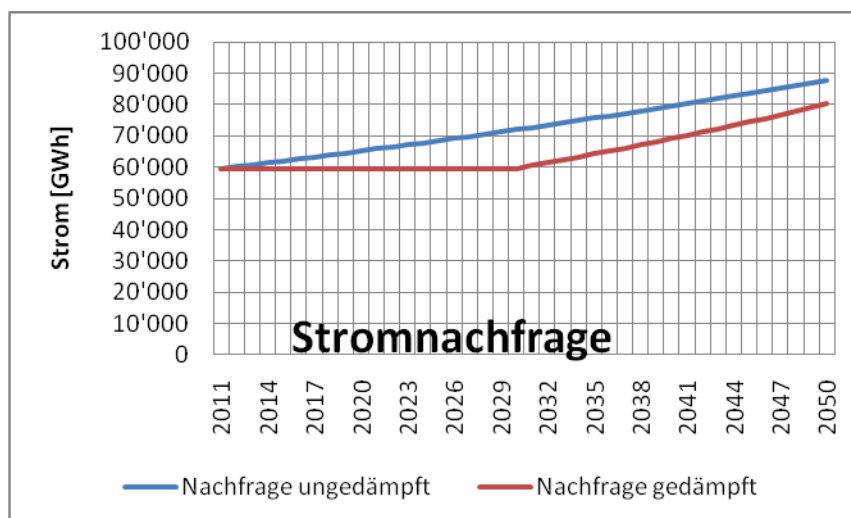


Abbildung 1: Stromnachfrage ungedämpft (Szenario 3) und gedämpft (Szenarien 1 und 2).

Das Wachstumsmodell geht von einem exponentiellen Wachstum aus, das ab gewissen Schwellenwerten der Installation pro Jahr und der gesamten Installation gedämpft wird.

Abbildung 2 zeigt das verwendete Wachstumsmodell für die PV in den Szenarien 1 und 2. Für die anderen Erneuerbaren wurde grundsätzlich das gleiche Modell verwendet (Tabelle 1).

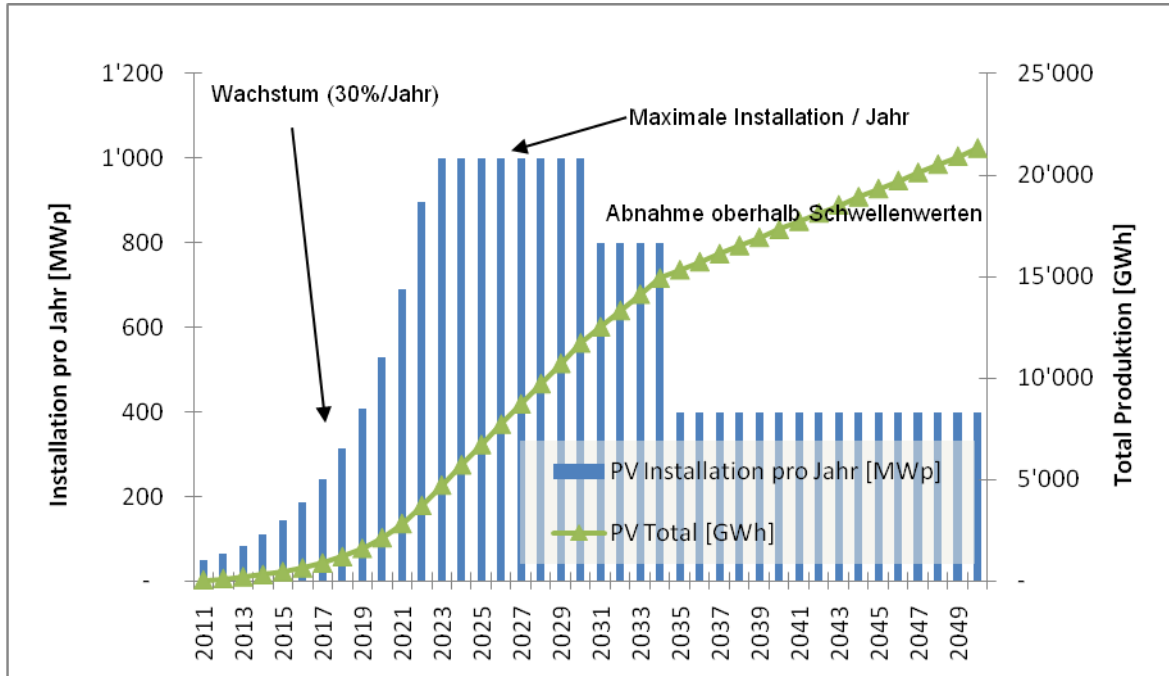


Abbildung 2: Verwendetes Wachstumsmodell für die PV.

Tabelle 1: Annahmen für die Wachstumsmodelle der verschiedenen Energiearten.

| Erneuerbare Energieart | Installation 2011 [GWh] | Wachstum [% / Jahr] | Max. Installation [GWh / Jahr] | Abschwächung oberhalb kumul. Installation [GWh] |
|------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------|---|
| PV Szenario 1 und 2 | 50 | 30 | 1000 | 12'000 / 16'000 |
| PV Szenario 3 | 50 | 10 | 500 | 10'000 |
| Wind | 20 | 20 | 50 | 1'200 |
| Wasser | 20 | 20 | 100 | 2'500 |
| WKK | 20 | 30 | 200 | 2'500 |
| Biomasse | 20 | 30 | 200 | 2'500 |

Erfahrungen aus den Nachbarländern zeigen, dass ein solcher Ausbau bei einer nicht begrenzten KEV durchaus übertroffen werden können.

Beim Szenario 1 werden die ersten drei AKW (Mühleberg und Beznau I und 2) im Jahr 2016 abgeschaltet, in der Annahme, dass eine allfällige Abstimmung im Jahr 2015 stattfinden würde. Beim AKW-Szenarium 3 wird 2026 ein neues AKW mit einer Jahresproduktion von 10 TWh in Betrieb genommen.

Die momentan bestehenden neuen erneuerbaren Energien (ausser Kleinwasserkraftwerke) werden nicht berücksichtigt, da diese relativ klein sind (Wind und Sonne: je knapp 100 GWh). Bestehende WKK produzieren gleichzeitig Strom und Wärme und sind in der Kategorie der konventionellen thermischen Kraftwerke enthalten. Die Potenziale von Wind, Wasser, WKK und Biomasse sind der Road Map Erneuerbare Energien der SATW entnommen (2006). Die bei der SATW Studie verwendeten Annahmen für die PV sind technologisch und ökonomisch bereits veraltet und deshalb viel zu tief. Das Potenzial der PV basiert auf der Arbeit von Gutschner und Nowak (1998).

Beim Ausbau der Wasserkraft wird zudem berücksichtigt, dass die Produktion auf Grund der einzuhaltenden Restwassermengen und des Klimawandels leicht zurückgehen wird (deshalb ist der Zuwachs netto auf 3 TWh begrenzt).

Bei der PV wird bei allen Szenarien mit folgenden Rahmenbedingungen gerechnet:

- Die Kostendegression wird auf 10% pro Jahr gehalten (2009 und 2010 lag diese bei 20%). Der Preis wird ab Erreichen von 20 Rp/kWh konstant gehalten.
- Speicherkosten der PV wird wie folgt berechnet: Bis 8 TWh werden keine Kosten verrechnet (gemäss Häberlin, 2010 und Baumgartner, 2010; Abbildung 9). Darüber hinaus werden Kosten von 9 Rp/kWh berechnet.

Die Stromkosten wachsen in den Modellen um 1.5% pro Jahr (Basis 8 Rp/kWh im Jahr 2011). Produktions- und Nachfragedaten basieren auf der Schweizerischen Elektrizitätsstatistik 2009 des BFE (2010). Bei der PV wird mit einer Jahresproduktion von 1000 kWh/kWp gerechnet und mit einem Anstieg des mittleren Wirkungsgrades von rund 13 auf 20% (bis 2050).

Die Produktion der konventionellen thermischen Kraftwerke (v.a. Kehrriichtverbrennungsanlagen und WKK) wird von 3 TWh (2011) bis 2050 auf 2.5 TWh linear gesenkt.

Geothermie ist nicht berücksichtigt, da die Unsicherheiten - insbesondere für die Stromproduktion - momentan noch zu gross sind. Solarthermische Anlagen sind ebenfalls nicht eingeschlossen, da diese Studie nur die Stromproduktion umfasst (das Potenzial würde ca. 16 – 20 TWh Wärme umfassen). Solarthermische Anlagen können allerdings den Strombedarf senken. Alleine mit kleinen Solaranlagen für die Warmwasserproduktion liesse sich einfach 1 TWh Strom sparen.

Resultate

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen, dass die bestehenden AKW in der Schweiz nach 40 oder 45 Jahren LZ problemlos abgeschaltet werden können. Die Lücke kann in den 2020er Jahren mit Solarstrom geschlossen werden und mit Effizienzmassnahmen gedrosselt werden. Importe nehmen erst nach 2035 zu. Ab diesem Zeitpunkt kann zudem davon ausgegangen werden, dass CO₂-armer Wind- oder Sonnenstrom importiert werden kann. **Der Ersatz muss vom Potenzial her eindeutig mit PV geschehen.** Wind, zusätzliche Wasserkraftwerke und WKK sind wichtig –aber jeweils rund Faktor 7 kleiner als PV. Wind, Wasser, WKK und Biomasse sind so gesehen nur die „Beilage“.

Der Bau von Gaskraftwerken ist im Gegensatz zu den Beteuerungen der Kraftwerksbetreiber nicht nötig. Gaskraftwerke wären zudem auch vom Schweizerischen Kraftwerkspark her gesehen wenig sinnvoll. Gaskraftwerke sind vor allem beim Einsatz im Mittel- und Spitzenlastbereich attraktiv, als Grundlastkraftwerke sind diese zu teuer. Der Mittel und Spitzenlastbereich wird aber in der Schweiz (im Gegensatz zu Deutschland) durch die Wasserkraft mehr als genug abgedeckt. Mittelfristig ist davon auszugehen, dass der Gaspreis markant steigt. Somit würden sich Gaskraftwerke gegenüber Stromimporten auch ohne CO₂-Kompensation in der Schweiz kaum lohnen. Höchstens bei einem sofortigen Ausstieg wäre der Bau von Gaskraftwerken notwendig. Sinnvollerweise wird Gas in WKK-Anlagen eingesetzt, wo gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt wird. Beim Szenarium mit 40 Jahren LZ tritt zwischen 2020 und 2030 eine Unterdeckung auf (Abb. 3). Diese kann aber auch durch temporären Import gefüllt werden. Auf die Auswirkungen bezüglich CO₂ wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

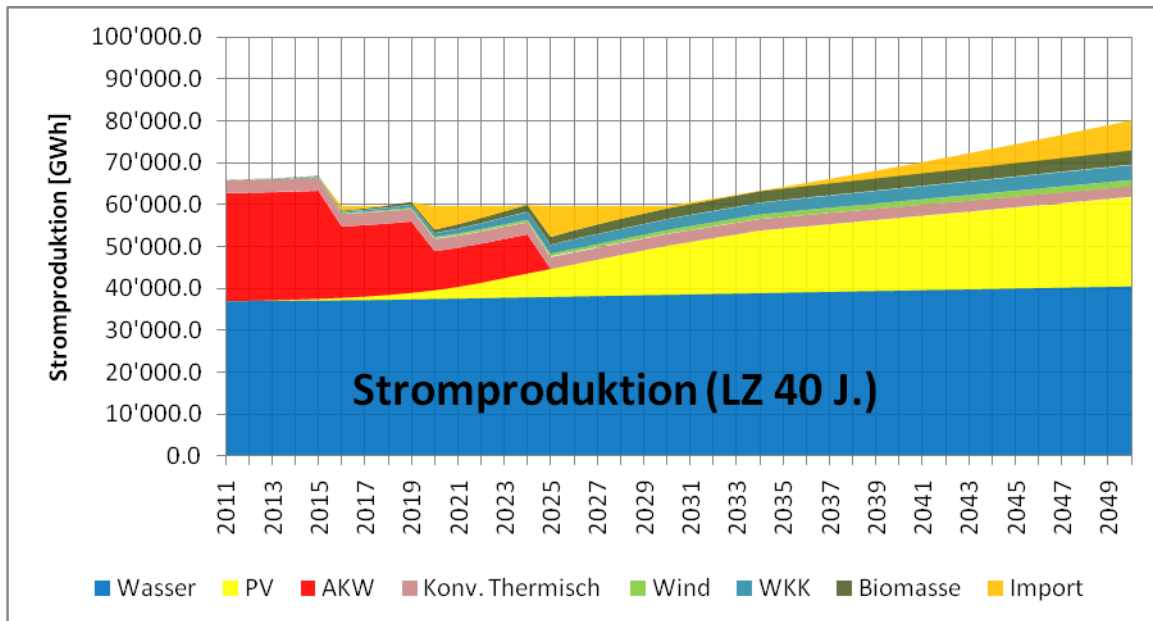


Abbildung 3: Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 1 (LZ 40 Jahre)

Wie Abbildung 4 zeigt, tritt bei einer LZ von 45 Jahren bis 2030 kaum eine Unterdeckung auf.

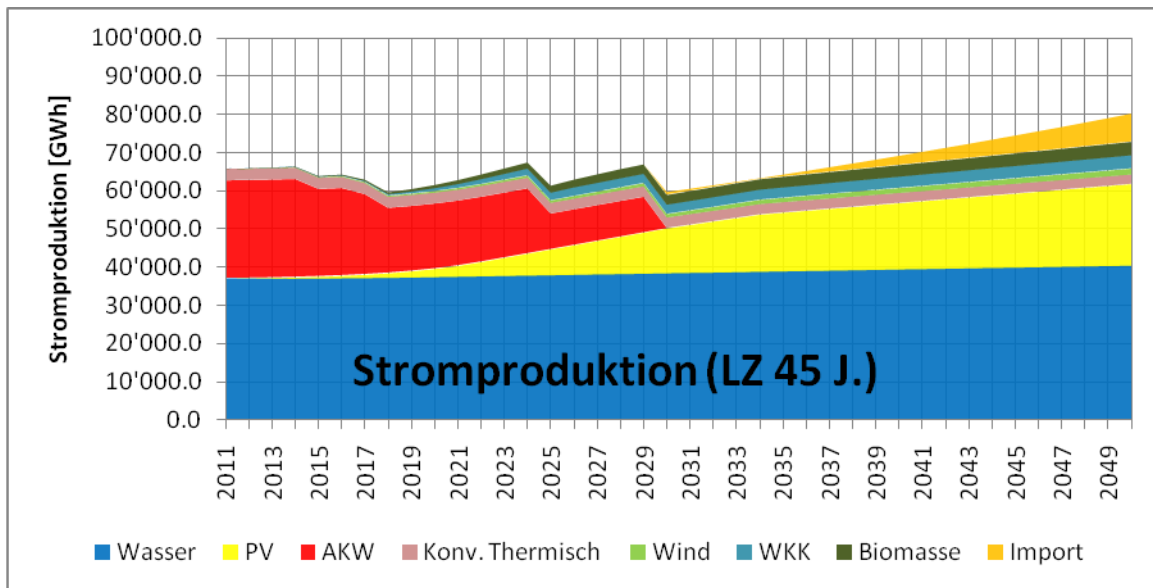


Abbildung 4: Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 2 (LZ 45 Jahre).

Wichtig bei beiden Szenarien 1 und 2 ist die Drosselung des Stromverbrauchs. Gelingt diese nicht, so muss deutlich mehr Strom importiert werden.

Die Lücken sind beim Szenario 3 mit einem neuen AKW deutlich grösser (Abb. 5). Die mässige Förderung des Solarstroms und die weniger weit gehenden Effizienzmassnahmen bewirken dort, dass nicht genügend Strom im Inland produziert werden kann.

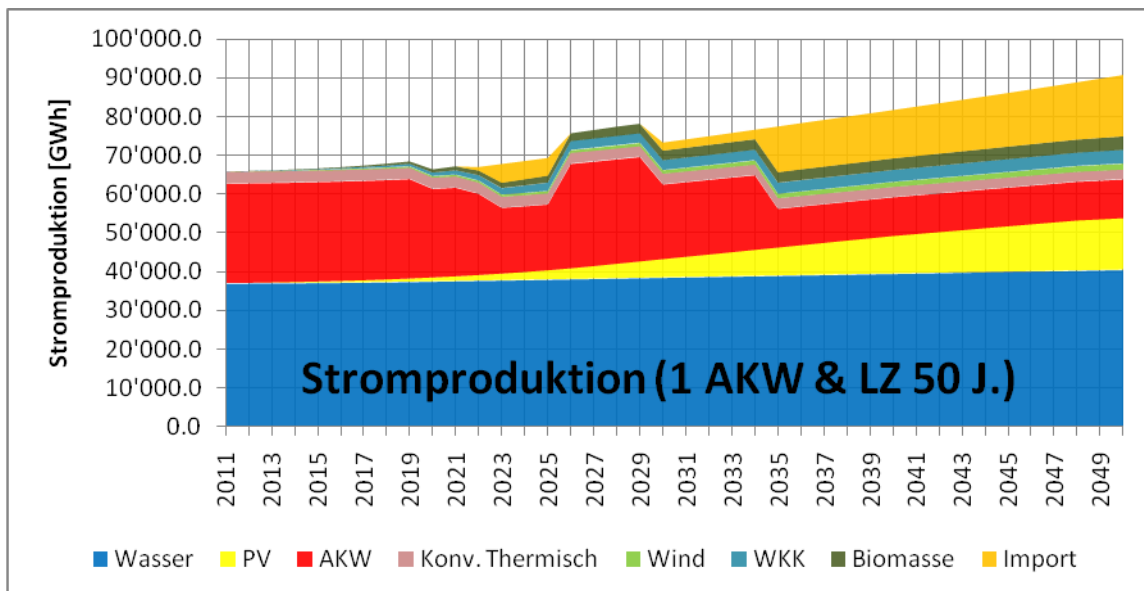


Abbildung 5: Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 3 (LZ 50 Jahre, 1 neues AKW).

Die Zusammensetzung der Stromproduktion 2050 mit den Szenarien 1 und 2 ist in Abbildung 6 und Tabelle 2 ersichtlich. Das Rückgrat der Produktion wird immer noch die Wasserkraft ausmachen. PV wird rund $\frac{1}{4}$ der Produktion betragen. Windenergie wird marginal bleiben ($< 2\%$). Wasserkraft kann um ca. 4% ausgebaut werden. WKK und Biomasse sind ebenfalls wichtig, aber auch von der Summe her viel kleiner als die PV.

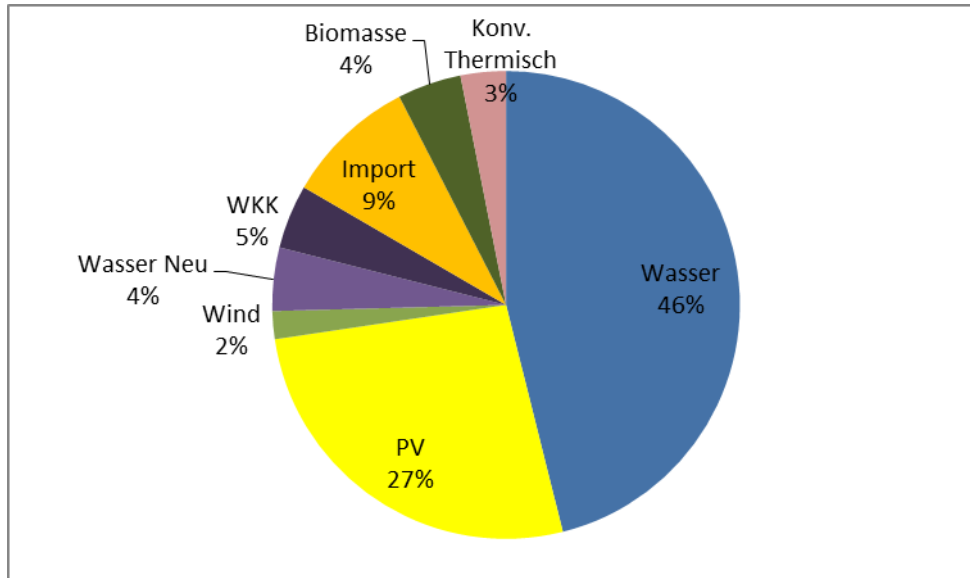


Abbildung 6: Stromanteile 2050 der Szenarien 1 und 2 (Total: 80 TWh).

Die 27% oder rund 21 TWh können mittelfristig mit PV in der Schweiz produziert werden. Dazu müssten rund ein Viertel der Dächer verwendet werden, was ungefähr dem Potenzial der sehr gut geeigneten Dächer entspricht. Der Wert liegt deutlich unter den Potenzialrechnungen von Gutschner und Nowak (1998) oder Rechsteiner (2008), zumal beide Studien die Erhöhung der Wirkungsgrade (von rund 10 auf über 20%) nicht oder nur teilweise beinhalten.

Tabelle 2: Stromproduktion 2025 und 2050 in TWh mit den 3 Szenarien

| Szenario | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| Zeitpunkt | 2025 | 2025 | 2025 | 2050 | 2050 | 2050 |
| Wasser | 37.0 | 37.0 | 37.0 | 37.0 | 37.0 | 37.0 |
| PV | 6.7 | 6.7 | 2.4 | 21.3 | 21.3 | 14.8 |
| Wind | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Wasser neu | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| WKK | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| Biomasse | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Summe EE neu | 12.2 | 12.2 | 7.9 | 33.3 | 33.3 | 26.8 |
| Konv. Thermisch | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Import | 7.5 | 0.0 | 4.6 | 7.3 | 7.3 | 15.9 |
| AKW | 0.0 | 9.3 | 17.0 | 0.0 | 0.0 | 10.0 |
| Summe | 59.6 | 61.4 | 69.4 | 80.3 | 80.3 | 92.3 |

Würde das AKW Mühleberg im Jahr 2011 abgestellt, würden sich die Resultate nur unmerklich ändern (Abbildung 10 im Anhang). Die Produktion der PV wird 2030 gemäss Szenarien 1 und 2 11.7 TWh betragen (Anteil 20%). Damit kann - zusammen mit den anderen Erneuerbaren und der Effizienz - genügend Energie produziert werden, um das letzte AKW im Jahr 2029 abzustellen (Szenario 2). Die dafür benötigte Fläche entspricht rund einem Achtel der Dachflächen der Schweiz.

Rund 10% oder 2 TWh könnten gut - müssten aber nicht - auf Freiflächen produziert werden. Denkbar wären auch Anlagen an Lawinverbauungen oder über Parkplätzen. Dazu wäre die Fläche von rund 18 km² notwendig – was 100 Bauernbetrieben entspricht. Zum Vergleich: Im Jahr 2010 gab es ca. 60'000 Bauernbetriebe und knapp 1000 Bauern gaben pro Jahr ihren Betrieb auf. Die Freiflächenanlagen können dem Bauernsterben sogar entgegenwirken, da sie einen Nebenerwerb für die Bauern schaffen. Die 18 km² würden einem Anteil von 0.4 Promille der Fläche der Schweiz entsprechen. Damit stellen die Freiflächenanlagen, die zudem immer noch extensiv für die Landwirtschaft genutzt werden können, keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion dar.

CO₂-Ausstoss

Die CO₂-Produktion der drei Szenarien sieht folgendermassen aus (vgl. Tabelle 3): Diese wird verursacht durch den Import von ausländischem Strom, der zu Beginn mit rund 450 g CO₂/kWh belastet ist (Klell und Clona, 2009). Mittelfristig kann davon ausgegangen werden, dass dieser gesenkt werden kann (die Berechnungen beruhen auf einer linearen Senkung bis auf 200 g CO₂/kWh im Jahr 2050). Die Produktion mittels inländischen Gaskraftwerken würde zu einer ähnlichen Grössenordnung der CO₂-Belastung führen (wobei diese von der Nachfrage her nicht oder nur kurzfristig notwendig wären).

Im Vergleich zum Gesamtausstoss der Schweiz von rund 40 Mio. t CO₂/Jahr sind die zusätzlichen Zahlen bei den Szenarien 1 – 3 recht klein (rund 1 – 4 %). Das Szenario 2 weist den kleinsten CO₂-Ausstoss auf. Das Szenario 3 mit einem AKW-Neubau verursacht die höchste CO₂-Produktion, da gleichzeitig die PV weniger stark gefördert und dadurch der Stromzuwachs kaum gedrosselt wird. Der Bau eines AKW bringt also nicht automatisch eine niedrigere CO₂-Belastung.

Tabelle 3: Mittlerer CO₂-Ausstoss pro Jahr der drei Szenarien (durch Importstrom oder neue Gaskraftwerke verursacht).

| Szenario | CO ₂ -Ausstoss in Mio. t/Jahr | CO ₂ -Ausstoss in Mio. t/Jahr |
|----------------------|--|--|
| | Szenarien 1 -3 | Szenarien 1 und 2 mit 1% Stromwachstum |
| 1 (PV / 40 J. LZ) | 0.7 | 3.1 |
| 2 (PV / 45 J. LZ) | 0.4 | 2.3 |
| 3 (1 AKW / 50 J. LZ) | 1.6 | 1.6 |

Falls die Effizienzmassnahmen beim Szenario 1 und 2 nicht ergriffen werden oder nicht greifen, erhöht sich der CO₂-Ausstoss bei den Szenarien 1 und 2 deutlich (Tab. 1, 3. Spalte). Das hier nicht untersuchte Szenario mit einer LZ von 50 Jahren ohne neues AKW würde bei einer Steigerung der Stromnachfrage von 1% gleich viel CO₂ produzieren wie das Szenario 3 (AKW).

Das prognostizierte Bevölkerungswachstum durch Einwanderung wird zu Mehrverbrauch und mehr Importen führen. Bezüglich CO₂ spielt dieser aber keine Rolle, da die eingewanderten Personen den

Strom mit gleichem CO₂-Anteil nicht mehr im Heimatland (v.a. in Europäischen Nachbarländern) verbrauchen.

Stromkosten

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Kosten der Stromproduktion. Durch die starke Kostensenkungsrate wird der PV-Strom schon 2020 auf 20 Rp/kWh sinken. Bei den Szenarien 1 und 2 werden die Kosten des PV-Stroms durch die zusätzlich benötigte Speicherung bis 2050 wieder auf 26 Rp/kWh anwachsen (Hinweis: die Speicherkosten beim AKW wurde weggelassen, obwohl auch dort Strom gespeichert werden muss). Die Stromkosten für ein neues AKW werden auf 12 Rp/kWh angesetzt (bis 2050 auf 14 Rp/kWh steigend). In dieser Zahl nicht enthalten sind die externen Kosten der fehlenden Versicherungsdeckung (diese ist in der Schweiz auf 1.8 Mrd. Fr. begrenzt). Diese externen Kosten liegen im Bereich von 3 Rp/kWh. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Stromkosten der Szenarien.

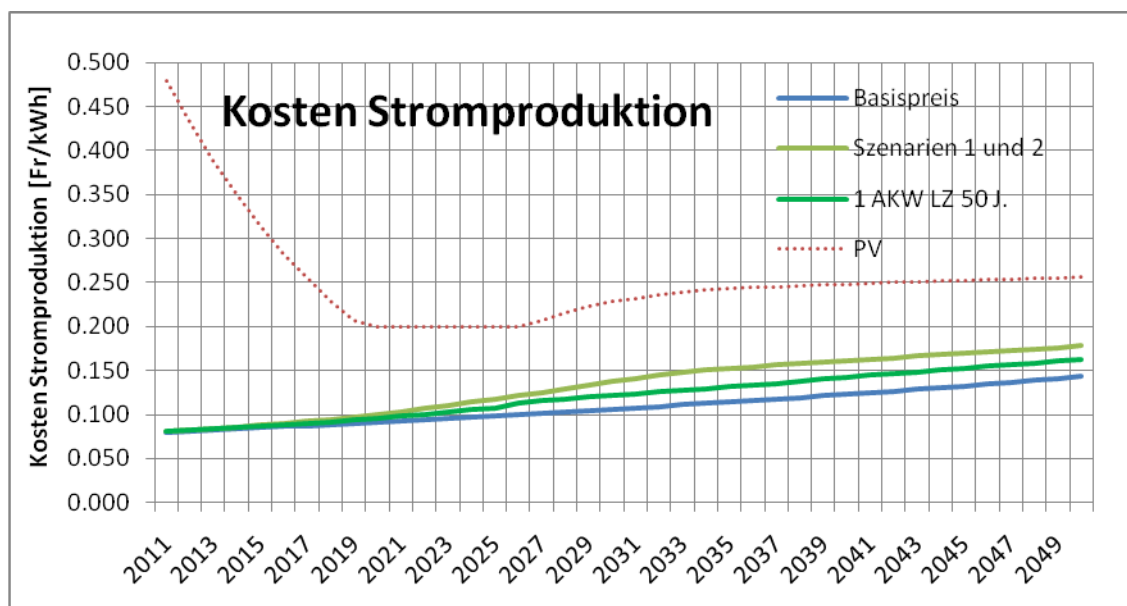


Abbildung 7: Verlauf der Kosten der Stromproduktion mit den Szenarien PV (1 und 2) und 3 („1 AKW LZ 50“). Gestrichelt: Produktionskosten der PV inkl. Speicher.

Bei den Szenarien 1 und 2 werden gegenüber dem Basispreis (8 Rp. plus 1.5% Zunahme pro Jahr) im Jahr 2050 ein Mehrpreis von 4 Rp/kWh erreicht (3 Rp. für PV, 1 Rp. für die restlichen Erneuerbaren). Dies ergibt pro Haushalt rund 120 Fr. / Jahr (im Jahr 2050), was absolut tragbar ist. Bei Szenario 3 wird ein Mehrpreis von 63 Fr. / Jahr und Haushalt erreicht. Der Unterschied zwischen beiden Varianten beträgt somit rund 52 Fr. / Jahr und Haushalt. Wenn die AKW ihre Versicherungskosten tragen müssten, würde der Unterschied der Szenarien nur noch 42 Fr./ Jahr und Haushalt betragen.

Wenn das Minimum der PV statt bei 20 bei 24 Rp/kWh stehen bleiben würde – was unwahrscheinlich ist - würden sich die Kosten der Szenarien 1 und 2 zudem nur um 1 Rp/kWh erhöhen.

Der Endkundenpreis dürfte auf Grund der Annahmen in den Szenarien 1 und 2 von durchschnittlich 16 Rp/kWh auf 28 Rp/kWh steigen, wovon nur 4 Rp. der Zunahme durch die Erneuerbaren begründet sind. Die restliche Differenz entsteht durch allgemeine Zunahme des Strompreises, was dem heutigen Preisniveau von einigen Nachbarländern gleichkommt. **Der massive Bau der PV führt demnach nur zu einem kleinen Anstieg der Stromkosten.**

Der Zubau der PV wird bei den Szenarien 1 und 2 in den nächsten 40 Jahren rund 41 Mrd. Fr. Investitionen benötigen, was ebenfalls tragbar erscheint. Von den 41 Mrd. fallen rund die Hälfte oder 20 Mrd. im Inland an, da der Anteil der Module an den Installationskosten, die grösstenteils im Ausland hergestellt werden, zunehmend kleiner wird. Beim Szenario 3 fallen zu Gunsten der PV und des AKW (12 Mrd. Fr.) rund 33 Mrd. Fr. an, wobei rund 15 Mrd. im Inland investiert würde. Auch aus Sicht der Investitionen sind die Szenarien 1 und 2 also positiver zu bewerten.

Variabilität

Die Kombination von 50% Wasserkraft und rund 25% PV ergänzen sich gut. **Die Speicherkraftwerke können die Schwankungen der PV gut ausgleichen.** PV-Anlagen produzieren zudem zu Zeiten der grössten Nachfrage während des Tages (Abb. 8). Für bis zu 8 GW installierter Leistung (8 TWh Jahresproduktion) ist keine zusätzliche Speicherung nötig in der Schweiz (mit Szenarien 1 und 2 wird diese Leistung im Jahr 2026 überschritten) (Häberlin, 2010 und Baumgartner et al., 2010). Bis 2050 wird ein Ausbau der Pumpspeicherung in den Szenarien 1 und 2 von 5 GW (im Bau oder bereits bestehend) auf 10 GW für den Ausgleich der Schwankungen zwischen Tag und Nacht notwendig sein, was technisch umsetzbar sein sollte. Alternativ dazu könnte ein Teil davon mittels „Smart Grid“ Technologien aufgefangen werden.

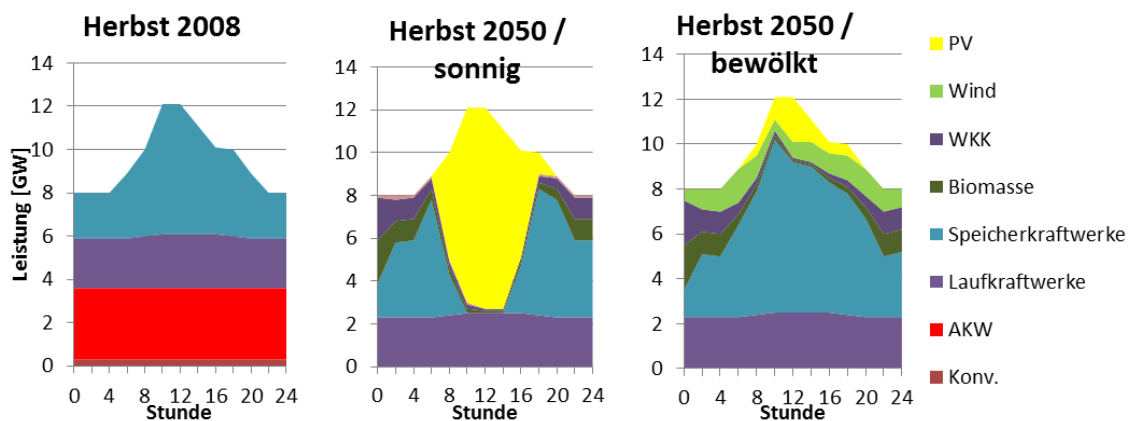


Abbildung 8: Tagesgang der Leistung der Stromerzeugung (Elektrizitätsstatistik 2008, BFE) vom 17.9.2008 (links). Mitte: Szenario 1 + 2 gleicher Tag mit Sonne; rechts: Szenario 1 + 2 ohne Sonne.

Das Verhältnis der Produktion zwischen Sommer- und Winter wird sich weiter vergrössern (von 57 auf 60%), auch wenn die Wasserkraftwerke wegen der Klimaerwärmung tendenziell mehr Energie im Winter produzieren werden. Wind und WKK fallen zudem hauptsächlich im Winter an, was den Unterschied ebenfalls verkleinert. Über alles gesehen ist ein Ausbau von saisonalen Speichern notwendig, falls dies nicht über den internationalen Austausch organisiert wird. Ökonomisch wird es nicht sinnvoll sein, den Ausbau des Speichers (rund 3 TWh) ganz inländisch umzusetzen (die Speicherkraftwerke können heute rund 8 TWh Strom speichern). Ein teilweiser Ausbau wie z.B. die Erhöhung der Staumauer des Grimselsees (0.24 TWh können so saisonal gespeichert werden) macht durchaus Sinn.

Weitere Speichermöglichkeiten werden notwendig sein, da sonst die Speichervolumen der Wasserkraftwerke um 30% erhöht werden müssten, was nicht machbar erscheint. Speichermöglichkeiten wie z.B. aus Solarstrom hergestelltes Methan oder Batteriespeicher (FVEE, 2010) werden mit Sicherheit entwickelt werden und Mitte des 21. Jahrhunderts kostengünstig (< 10

Rp/kWh) zur Verfügung stehen. Insgesamt spricht die Variabilität der Solarstrahlung also nicht gegen den starken Ausbau von dieser. **Die sichere Versorgung ist gewährleistet.**

Eine Stromversorgung, die zu jeder Zeit (alle Sekunden eines Jahres) vollständig durch inländische Produktion sicher gestellt ist, wäre weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll.

Ob und wie ein Netzausbau notwendig ist, kann in dieser Studie nicht geklärt werden (dazu wären dynamische Simulationen notwendig). Tendenziell dürften diese mit den Szenarien 1 und 2 nicht grösser sein als bei einem Ausbau der AKW. Die Leitung Mühleberg – Wattenwil müsste z.B. nur im Zusammenhang mit einem neuen, rund 4 Mal grösseren AKW in Mühleberg gebaut werden. Deutsche Studien (BSW, 2010) zeigen, dass Solarstrom die Netze nicht allzu stark belasten. Ein teilweiser Netzausbau wird notwendig sein. Ab 2030 wird es darauf ankommen, ob dezentrale Speichermöglichkeiten zur Verfügung stehen oder nicht.

Fazit

Ein rascher Ausstieg aus der Atomkraft ist technisch machbar, ökonomisch vorteilhaft – und ohne neue Gaskraftwerke oder namhafte CO₂-Steigerung umsetzbar.

An der starken Förderung der PV führt kein Weg vorbei. Alle anderen Erneuerbaren (Wasser, Wind, WKK und Biomasse) weisen ein deutlich kleineres Potenzial auf. Der verzögerte Ausbau der Windkraft durch Einsprachen spielt für die Erreichung des Ausstiegs keine Rolle. Bei der PV sind die Einsprachegründe und -möglichkeiten viel geringer. Die Förderung muss mit einer möglichst **raschen Aufhebung der KEV** erreicht werden. Erfahrungen aus dem Ausland zeigen, dass alle anderen Wege zur Förderung der Erneuerbaren ineffizient und nicht zielführend sind. Die Aufhebung des Deckels würde zudem den administrativen Aufwand massiv senken. Bei der KEV ist darauf zu achten, dass die Einspeisetarife rasch sinken und nicht zu hoch (aber auch nicht zu tief) angesetzt werden (z.B. mit einem „atmenden“ Deckel analog dem deutschen Einspeisegesetz). Die heutigen Vergütungssätze sind – angesichts der Verhältnisse in Deutschland - eher zu hoch angesetzt (was zu überbewerteten Anlagen führt). Die Vergütungsdauer kann zudem von 25 auf 20 Jahre gesenkt werden. Der Vorrang der Einspeisung der erneuerbaren Energien muss unbedingt beibehalten werden.

Der starke Zubau der PV wird die Stromkosten nur wenig erhöhen, da die Kosten der PV rasch auf ein Niveau von 20 Rp/kWh sinken werden (bereits heute liefern die günstigsten PV-Kraftwerke weltweit Strom für 12 Rp/kWh). Der Ausstieg kostet 4 Rp/kWh, was pro Haushalt rund 120 Fr. / Jahr ausmacht und damit absolut tragbar ist.

Effizienzmassnahmen sind zentral. Bekanntlich könnten mit vorhandener Technologie der Stromverbrauch um rund 30% gesenkt werden. Dies wird aber kaum umsetzbar sein, da auch ein Teil der fossilen Energieträger auf Strom umgelagert wird (was von der Klimapolitik her erwünscht ist). Ein konstanter Stromverbrauch sollte aber z.B. mit strikten Gerätevorschriften oder der Einführung von progressiven Tarifen (Abschaffung Grundtarif, je mehr Verbrauch desto höhere Tarife) durchsetzbar sein. Für den Stromsektor alleine ist die Einführung einer Stromlenkungsabgabe nicht unbedingt nötig. Diese macht aber grossen Sinn, um die Stromnachfrage der bisherigen Verbraucher zu senken. Damit würden Potenziale geschaffen, damit weitere Teile der fossilen Energieträger (die 75% des Schweizerischen Energieverbrauchs ausmachen) rasch umgelagert werden könnten, was für den Klimaschutz wichtig ist.

Der Ausstieg ist somit mit einfachen politischen Massnahmen rasch umsetzbar, das Patentrezept dazu existiert.

Das Szenario 2 ist bezüglich CO₂-Austoss die beste Variante. Das Szenario 1 senkt die Gefahren und die Menge der radioaktiven Abfälle der AKW rascher ab. Ein Abwägen zwischen den beiden Varianten ist nicht einfach.

Dass die grossen Kraftwerksbetreiber so vehement gegen die Erneuerbaren und insbesondere gegen den Solarstrom anschreiben, hat direkte betriebswirtschaftliche Gründe:

- Sie verlieren einen Teil ihres Marktes, da PV häufig von privaten Kunden produziert wird.
- PV erzeugt vor allem Strom über die Mittagszeit. In dieser Zeit wurde in der Schweiz in der Vergangenheit besonders viel Geld verdient, indem Spitzenstrom ins Ausland verkauft werden konnte. Dies könnte in Zukunft weniger der Fall sein.
- Der vorzeitige Ausstieg würde die Goldgrube AKW zum Versiegen bringen. Diese abgeschriebenen Kraftwerke produzieren hohe Gewinne, auch weil die externen Kosten nicht durch die Betreiber bezahlt werden.

Der Umbau auf eine nachhaltige Energieproduktion würde bei den grossen Kraftwerksbetreiber grössere Veränderungen auslösen. Neben Einbussen sind aber auch zusätzliche Einnahmen durch die erhöhte Produktion und Speicherung zu erwarten.

Eine Entkopplung der Gewinne der Stromkonzerne von der Menge des verkauften Stroms wäre die effizienteste Methode, um die Stromeffizienz zu erhöhen. Das Modell, das in Kalifornien seit Anfang der 1970er Jahren angewendet wird, bewirkte, dass der Stromverbrauch dort seit dieser Zeit nicht mehr anstieg.

Literatur

Baumgartner, Achtnich, Remund, Gnos und Nowak, 2010: Steps towards integration of PV-electricity into the grid. Prog. Photovolt: Res. Appl. (2010)

BFE, 2010: Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008 und 2009.

http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=00765

Clell und Klona, 2009: Wirkungsgrade und CO₂-Emissionen verschiedener Energieketten.

<http://www.hycenta.tugraz.at/Image/Report%20Hy8-2009%20HyCentA%20Research%20GmbH.pdf>

FVEE, 2010: Energiekonzept 2050.

http://www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf

Gutschner und Nowak, 1998: Potentiel Photovoltaïque dans le Canton de Fribourg, Novembre 1998

Häberlin, 2010: Photovoltaik. Verlag VDE, 2010

Infras und TNC 2010: Stromeffizienz und erneuerbare Energien – wirtschaftliche Alternative zu Grosskraftwerken. 2010,

http://www.aee.ch/fileadmin/user_upload/Downloads/Downlaods/Wirtschaft/Studie_Infras_Zusammenfassung_d.pdf

BSW, 2010:

[http://www.solarwirtschaft.de/medienvetreter/pressemeldungen/meldung.html?tx_ttnews\[tt_news\]=13445&tx_ttnews\[backPid\]=737&cHash=bb729308e1](http://www.solarwirtschaft.de/medienvetreter/pressemeldungen/meldung.html?tx_ttnews[tt_news]=13445&tx_ttnews[backPid]=737&cHash=bb729308e1)

Rechsteiner, 2008: Bern erneuerbar.

http://www.energieinitiative.ch/uploads/media/Bern_erneuerbar_Studie.pdf

SATW, 2006: Road Map Erneuerbare Energien. www.satw.ch

Anhang

Tabelle 4 zeigt die Anteile der neuen erneuerbaren Energien von Tabelle 2, die im Kanton Bern 2025 und 2050 produziert werden könnten. Für PV, WKK und Biomasse wurde ein Anteil von 13% an der gesamtschweizerischen Produktion angenommen, für Wind 25% und für neue Wasserkraft 20%.

Tabelle 4: Stromproduktion 2025 und 2050 der neuen Erneuerbaren in TWh mit den 3 Szenarien im Kanton Bern.

| Szenario | Anteil Bern von CH | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|--------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| Zeitpunkt | - | 2025 | 2025 | 2025 | 2050 | 2050 | 2050 |
| PV | 13% | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 2.8 | 2.8 | 1.9 |
| Wind | 25% | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Wasser neu | 20% | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| WKK | 13% | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Biomasse | 13% | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Summe EE neu | - | 1.7 | 1.7 | 1.2 | 4.8 | 4.8 | 3.5 |

In dieser Studie wurden die Effizienzmassnahmen nicht abgebildet. Als Ergänzung dazu zeigt Abbildung 9 den Verlauf der Stromproduktion unter Annahme eines 1.3% Wachstums inklusive Effizienzmassnahmen (2035: 17 TWh). Das Total der Produktion inkl. Effizienz steigt damit im Jahr 2035 auf 81 TWh.

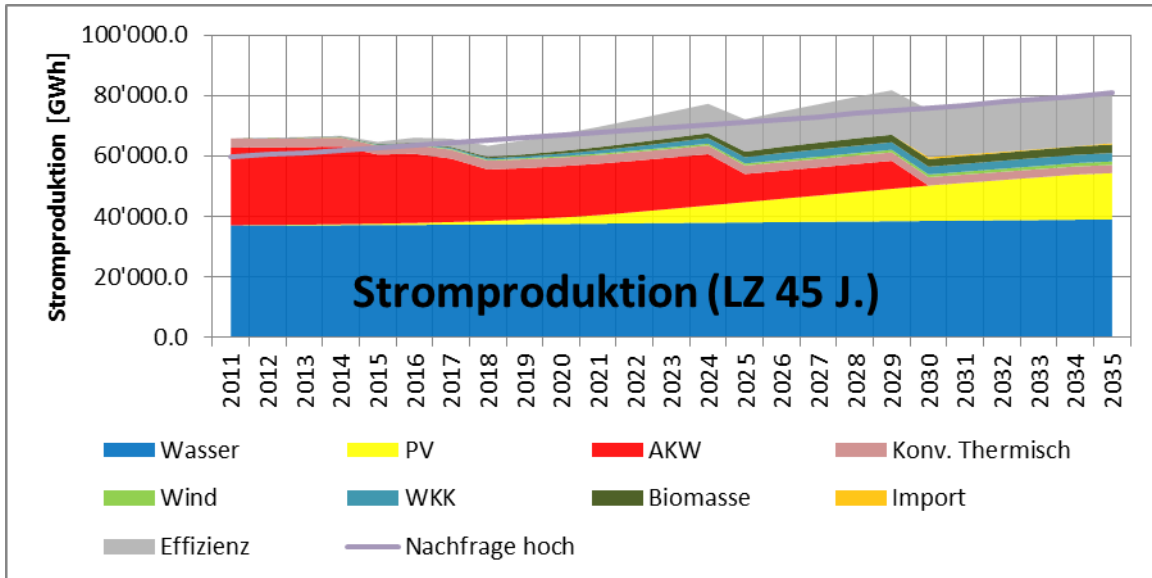


Abbildung 9: Stromproduktion 2011 – 2035 mit Szenario 2 (LZ 45 Jahre) inkl. Effizienzmassnahmen.

Müsste das AKW Mühleberg im Jahr 2011 aus Sicherheitsgründen oder wirtschaftlichen Gründen (wegen zu hohen Kosten für die Sicherheit) abgestellt werden, würden sich die Resultate dieser Studie nur unmerklich ändern (Abbildung 10).

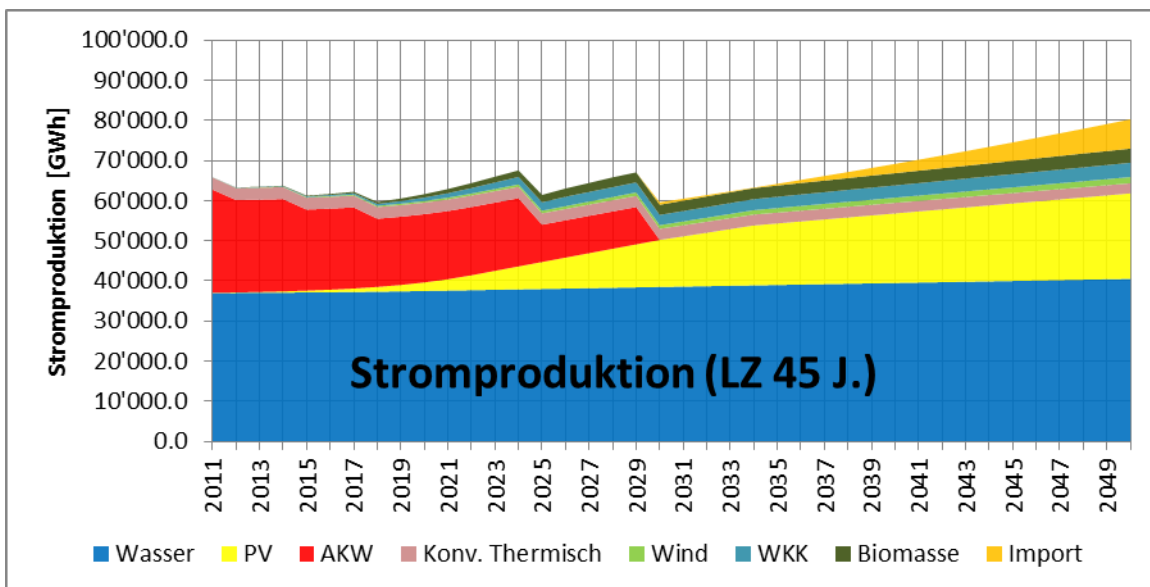


Abbildung 10: Stromproduktion 2011 – 2050 mit Szenario 2 (LZ 45 Jahre) mit Abschaltung AKW Mühleberg Ende 2011.

Abkürzungen

KEV Kostendeckende Einspeisevergütung

LZ Laufzeit

PV Photovoltaik

WKK Wärmekraftkoppelung

Masseinheiten

KWh Kilowattstunde

GWh Gigawattstunde

TWh Terawattstunde

MWp Megawattpeak (Messung der Spitzenleistung bei Photovoltaik-Anlagen)

1 MW = 1'000 KW

1 GW = 1'000 MW = 1'000'000 KW

1 TW = 1'000 GW = 1 Mio. MW = 1 Mrd. KW