

Ziel der Studie

Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW ist bestrebt, die wichtige Diskussion um die künftige Stromerzeugung zu versachlichen und die Grundlagen für eine offene, faktenbasierte und zukunftsgerichtete Diskussion in Gesellschaft, Politik und Wirtschaft zu liefern. Zu diesem Zweck wurde die Professur für Energiepolitik der ETH Zürich beauftragt, die Gesamtenergiebilanz verschiedener Anlagen der Stromerzeugung zu ermitteln und vergleichbar darzustellen. Zudem sollten Aussagen über die zukünftige Entwicklung der entsprechenden Technologien gemacht werden. Da es sich bei Investitionen in die Stromerzeugung um langfristige Entscheidungen handelt, ist nicht nur der Status quo entscheidend, sondern auch die Erwartung, wie sich entsprechende Technologien mittelfristig entwickeln werden. Die Studie soll periodisch aktualisiert werden.

Hintergrund

Die Anstrengungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen führen weltweit zu grundlegenden Umwälzungen bei der Stromproduktion. Neue erneuerbare Formen der Stromproduktion sind weltweit die grossen Hoffnungsträger, um den steigenden Strombedarf bei gleichzeitigem Ersatz fossiler Brennstoffe zu decken. Auch in der Schweiz können neue erneuerbare Formen eine entscheidende Rolle spielen. Im Vorfeld der Abstimmung über das neue Energiegesetz am 21. Mai 2017 hat sich jedoch einmal mehr gezeigt, dass grosse Unsicherheiten über die Eignung der verschiedenen Formen der Energiegewinnung bestehen und bisweilen nicht hinreichend faktenbasiert argumentiert wird. Eine neue Studie zu Kosten und Lebenszyklusemissionen¹ hilft, die Debatte zu versachlichen, indem sie für den Zeitraum bis 2050 u.a. Kosten- und Treibhausgassenkungspotenziale (z.B. für Photovoltaik) aufzeigt. Die Gesamtenergiebilanz verschiedener Technologien war jedoch bis jetzt nicht klar dargelegt.

¹ Bauer, C., et al (2017), Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies, Bundesamt für Energie BFE, Ittigen, 01.11.2017

Impressum

Autoren der Studie: Bjarne Steffen, Dominique Hischier und Tobias S. Schmidt (Professur für Energiepolitik an der ETH Zürich)
Begleitgruppe: Willy R. Gehrler, Rolf Hügli und Ulrich W. Suter (SATW)
Redaktion: Beatrice Huber und Adrian Sulzer (SATW)
Bild: Swisswinds / Olivier Maire

Kernaussagen der Studie

- Die Studie belegt eindrücklich die positive Gesamtenergiebilanz der Wasserkraft. Doch auch Photovoltaik und vor allem Windkraft zeigen positive Werte. Beeindruckend ist aber, wie deutlich die Wasserkraft andere Formen der Stromerzeugung beim Erntefaktor überflügelt.
- Die Effizienz von Photovoltaik und Windkraft ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen und weitere Verbesserungen sind künftig zu erwarten. Der Ausstieg aus der Kernenergie hat das Potenzial, die Gesamtenergiebilanz und damit die Nachhaltigkeit der Stromproduktion in der Schweiz zu verbessern und nicht umgekehrt, wie bisweilen postuliert.
- Der Umbau des Schweizer Energieversorgungsystems führt dazu, dass der Anteil stochastischer – also schwankender – Stromproduktion aus Photovoltaik und Windkraft weiter steigt. Die Speichertechnologie wird also künftig eine immer wichtigere Rolle als Regelernergie einnehmen.
- Bei Stromspeicher-Technologien sind Wasserspeicherkraftwerke gegenüber Power-to-Gas-to-Power-Verfahren und Batterien klar im Vorteil. Trotz der aktuell schwierigen ökonomischen Situation der Wasserkraft sollte die Schweiz also aus Sicht der Gesamtenergiebilanz auch künftig an ihr als wichtigste Säule der Stromversorgung festhalten.
- Obwohl umstritten, waren staatliche Förderprogramme wie die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) wichtige Impulsgeber für Innovationen im Energiesektor. Sie schaffen Anreize für die Installation entsprechender Kapazitäten, was die technologische Entwicklung entlang der Lernkurve beschleunigt.
- Andere nicht-stochastische erneuerbare Energieformen, wie die Geothermie, können künftig ebenso eine wichtige Rolle einnehmen. Deshalb sollte die Politik prüfen, ob auch für diese Technologien ein Fördermechanismus anzustreben ist.
- Schliesslich stützen die Erkenntnisse der Studie den von Bundesrat und Parlament mit der Energiestrategie 2050 eingeschlagenen Weg, der einen starken Zubau neuer erneuerbaren Energien in der Schweiz vorsieht, auch aus Sicht der Gesamtenergiebilanz.



Studien-Kurzfassung

Stromproduktion: Erneuerbare sind spitze

Eine neue Studie ermittelt eine sehr gute Gesamtenergiebilanz für die Wasserkraft sowie die neuen erneuerbaren Energien in der Schweiz.

Im Auftrag der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften SATW haben Fachleute der Professur für Energiepolitik an der ETH Zürich erstmals die Gesamtenergiebilanz der wichtigsten Formen der Stromproduktion in der Schweiz nach einer einheitlichen Methodik analysiert. Dafür wurden zwei Kennzahlen berechnet:

- **Gesamtenergiebedarf (nicht erneuerbar)** bzw. «Non-Renewable Cumulative Energy Demand»: kumulierter Bedarf an nicht erneuerbarer Energie für den Bau und die Entsorgung einer Anlage sowie für die eigentliche Stromproduktion. Bei fossilen Produktionsverfahren ist dies in erster Linie die Energie im jeweiligen Brennstoff (Gas, Kohle, Uran).
- **Erntefaktor** bzw. «Energy Return on Energy Investment» (EROI): beschreibt das Verhältnis des produzierten Stroms zur investierten («grauen») Energie über die gesamte Lebensdauer einer Anlage und sollte immer grösser als 1 sein.

Anhand dieser Kennzahlen lassen sich Aussagen zur **Gesamtenergiebilanz** machen:

- Die Gesamtenergiebilanz der Wasserkraft ist herausragend.
- Die Analyse bekräftigt das Argument, die Wasserkraft als wichtigsten Pfeiler der Schweizerischen Stromversorgung unbedingt zu erhalten.
- Auch neue erneuerbare Energien schneiden gut ab.
- Aufgrund der technologischen Lernkurve hat sich der Erntefaktor neuer erneuerbarer Energien in den letzten zehn Jahren stark erhöht und wird künftig weiter steigen.
- Der vom Bund in der Energiestrategie 2050 vorgesehene Schweizer Strommix dürfte zu einer weiteren Verbesserung der Gesamtenergiebilanz führen.
- Öffentliche Förderprogramme tragen massgeblich zur positiven Entwicklung der neuen erneuerbaren Energien (und anderer Technologien) bei, auch bezüglich Gesamtenergiebilanz.

Bestandsaufnahme der Gesamtenergiebilanz

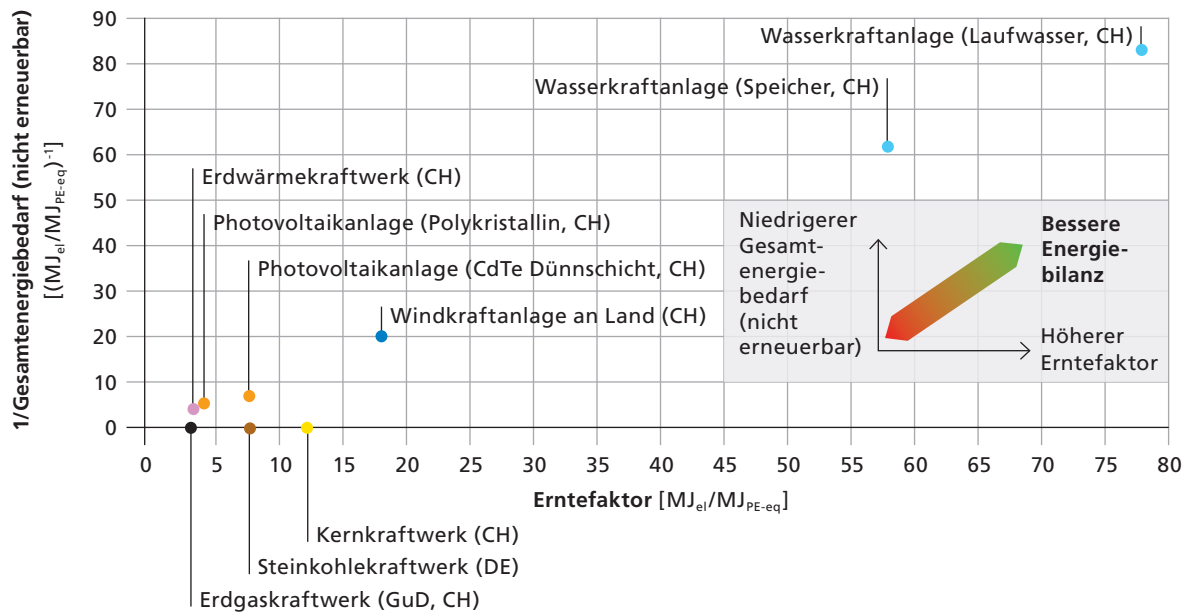


Abbildung 1: Die Gesamtenergiebilanz, ermittelt aus den Kennzahlen «Gesamtenergiebedarf (nicht erneuerbar)» und «Erntefaktor (EROI)», zeigt ein deutliches Bild: Die Wasserkraft schlägt alle übrigen Arten der Stromerzeugung um Längen. Doch auch Photovoltaik und Windkraft schneiden gut ab.

Unter den in der Schweiz eingesetzten Verfahren zur Stromproduktion schneidet die Wasserkraft bezüglich Gesamtenergiebilanz deutlich am besten ab, wobei Laufwasserkraftwerke bessere Werte erreichen als Speicherkraftwerke. Sie verfügen über den niedrigsten nicht-erneuerbaren Gesamtenergiebedarf sowie den mit Abstand höchsten Erntefaktor. In Anbetracht des Schweizer Strommix mit rund 60 Prozent Wasserkraft ist das ein erfreuliches Resultat. Die nächstbeste Gesamtenergie-

bilanz hat die Windkraft, selbst unter hiesigen Bedingungen. Bei fossilen Technologien ist der nicht-erneuerbare Gesamtenergiebedarf aufgrund des verwendeten Brennstoffs naturgemäss höher als bei erneuerbaren, womit sie auch punkto Gesamtenergiebilanz schlechter abschneiden. Den höchsten Erntefaktor weist dort die Kernenergie auf, gefolgt von Steinkohlekraftwerken. Doch beide liegen bereits klar hinter der Windkraft zurück.

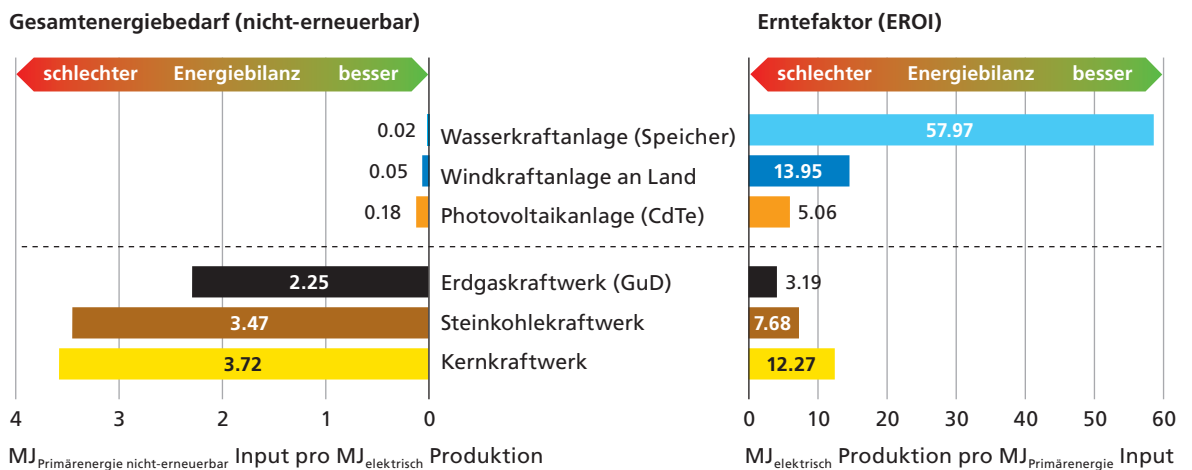


Abbildung 2: Die Resultate bzgl. Gesamtenergiebedarf und Erntefaktor zeigen deutlich die grosse Überlegenheit der Wasserkraft.

Erntefaktor: Wind und Photovoltaik legten dank Lerneffekten deutlich zu

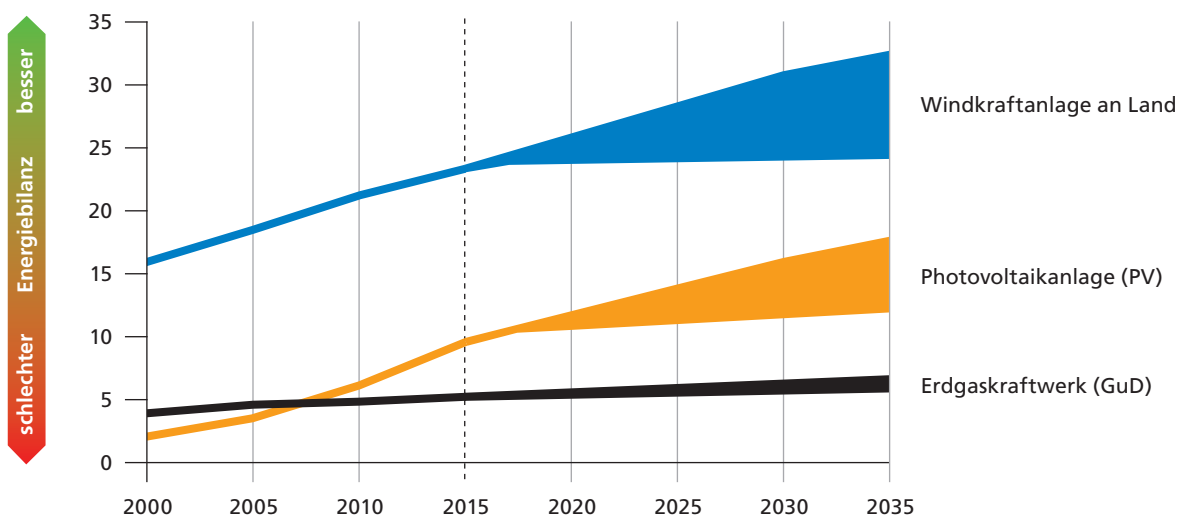
Die Effizienz einer Technologie verbessert sich mit zunehmender Verbreitung und Erfahrung. Entsprechende Effekte von Lernkurven konnten für den Energiesektor in diversen Studien nachgewiesen werden. Dadurch haben in der Vergangenheit Photovoltaik und Windkraft grosse Fortschritte in Bezug auf Kosten, aber auch den Erntefaktor erzielt. Um Voraussagen über die künftige Entwicklung machen zu können, haben die Autoren einen dynamischen Erntefaktor entwickelt. Dafür wurden historische Lernkurven für typische mitteleuropäische Standorte analysiert und in die Zukunft extrapoliert, wobei grössere Unsicherheiten bezüglich der künftig installierten Leistung und Lerneffekten berücksichtigt wurden, nicht jedoch disruptive technologische Entwicklungen. Vier Verfahren der Stromerzeugung wurden untersucht: Erdgas (Gaskombikraftwerke), Photovoltaik, Windkraft und Steinkohle. Da Steinkoh-

lekraftwerke für die Schweiz allerdings nicht relevant sind, wurden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

Aufgrund mangelnder Daten und grosser Varianzen im nuklearen Brennstoffkreislauf (insbesondere Abbau und Anreicherung von Uran) sowie der sehr unterschiedlichen, standortabhängigen Energieaufwendungen beim Bau von Wasserspeicherkraftwerken konnte kein dynamischer Erntefaktor für die beiden in der Schweiz wichtigsten Arten der Stromerzeugung berechnet werden. Da der Ausstieg aus der Kernenergie jedoch politisch beschlossen ist und das Ausbaupotenzial der Wasserkraft beschränkt ist, zeigt die Studie gut auf, welches aus energetischer Sicht die lohnendsten Alternativen sein können, um die wegfallende Kernenergie künftig zu kompensieren und eine allfällige Zunahme des Strombedarfs zu decken.

Erntefaktor (EROI)

$MJ_{\text{elektrisch}}$ Produktion pro $MJ_{\text{Primärenergie}}$ Input



Anmerkung: Aufgrund begrenzter Verfügbarkeit historischer Daten aus der Schweiz wurde die Simulation für typische mitteleuropäische Standorte durchgeführt (mit durchschnittlich besseren Windressourcen als für bestehende Schweizer Anlagen)

Abbildung 3: Bisherige und erwartete Entwicklungen des Erntefaktors von Windkraft an Land, Photovoltaik sowie Gaskombikraftwerk. Während die Prognosen bei allen Szenarien eng beieinanderliegen, zeigt das Zielband als Fächer eine relativ grosse Varianz. An der grundlegenden Reihenfolge und den Trends ändert die Wahrscheinlichkeitssimulation aber kaum etwas.

Basierend auf den Berechnungen wird bei der Windkraft an Land bis 2035 eine Verbesserung des Erntefaktors auf 25 bis 30 erwartet, je nach betrachtetem Szenario. Gründe dafür sind grössere Anlagen mit höherer Leistung und Energieausbeute, neue Materialien sowie Verbesserungen bei standardisierten Komponenten (z.B. Transformatoren und Spannungswandler). Der Erntefaktor der Photovoltaik dürfte sich aufgrund effizienterer Module, besserer Produktionsmethoden sowie Skaleneffekten bei der Herstellung in höheren Stückzahlen auf 12 bis

17 verbessern. Demgegenüber fallen die untersuchten Arten der brennstoffbasierten Stromerzeugung ab. Gaskombikraftwerke – die für die Schweiz relevanteste Technologie – dürften 2035 einen Erntefaktor in der heutigen Grössenordnung von 5 bis 6 haben. Naturgemäss sind solche Prognosen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien verändert sich aber weder die Reihenfolge der Technologien noch der Umfang der zu erwartenden Effizienzgewinne grundsätzlich.

Datengrundlage

Grundlage der Analyse waren primär die Zahlen von «ecoinvent» (www.ecoinvent.ch), der weltweit führenden Datenbank für Lebenszyklusanalysen. Dabei wurde der Energiebedarf über die gesamte Lebensdauer der Produktionsanlagen berücksichtigt, also inklusive Bau, Abriss und Entsorgung. Für Formen der Energieerzeugung, die hierzulande nicht existieren, wurden Zahlen aus anderen europäischen Ländern verwendet, wie Deutschland (Steinkohle) oder Dänemark (Offshore-Windenergie). Wo ecoinvent keine Daten liefern konnte, wurde auf andere Quellen zurückgegriffen, wie die Internationale Energieagentur (IEA) oder die Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA).

Beurteilung der Speichertechnologien

Ein weiterer Teil der Studie beschäftigt sich mit verschiedenen Möglichkeiten der Stromspeicherung. Dazu verwenden die Autoren die Kennzahl «Energy Stored on Energy Investment (ESOI)», welche die Gesamtmenge der über die Lebensdauer gespeicherten Energie ins Verhältnis setzt zur investierten Energie für die Produktion des Speichermediums. Besonders schlecht schneiden Bleiakkumulatoren ab. Ihr ESOI-Wert liegt bei 1. Sie speichern über ihre Lebensdauer also insgesamt nur so viel Energie, wie für ihre eigene Produktion benötigt wird. Bereits deutlich höher liegt der Wert bei Lithium-Ionen-Batterien (Faktor 7) oder Power-to-Gas-to-Power-Verfahren (Faktor 23). Mit einem ESOI von 186 sind aber Wasserspeicherkraftwerke klare Spitzenreiter der Speichertechnologie. Die Wasserkraft hat also auch hier die Nase vorn. Viele Speichertechnologien befinden sich aber noch am Anfang ihrer Lernkurve, sodass dort noch grosse Verbesserungen erwartet werden dürfen.
