

Zeitschrift: Energie & Umwelt : das Magazin der Schweizerischen Energie-Stiftung SES

Herausgeber: Schweizerische Energie-Stiftung

Band: - (2020)

Heft: 1: Die Energie von morgen

Artikel: Wege zu einer 100% erneuerbaren Schweiz

Autor: Pfenninger, Stefan

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-864650>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

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



Wege zu einer 100 % erneuerbaren Schweiz

100 % erneuerbar ist machbar. Und sehr unterschiedliche Systeme sind möglich.
Was es zuerst braucht, ist politischer Wille und ein Wandel im Denken.



Von Dr. Stefan Pfenninger

ETH Zürich, Institut für Umweltentscheidungen,
stefan.pfenninger@usys.ethz.ch

Ist eine Stromversorgung mit nur Wasserkraft, Windkraft und Sonnenkraft möglich? Die Welt ist weit davon entfernt: 2018 stammten global bloss 23 % des Stroms aus diesen drei Quellen. Nimmt man die Energie für andere Aktivitäten wie Strassenverkehr und Heizen dazu, welche momentan fast ausschliesslich fossiler Herkunft ist, schrumpft der globale Wasser-Wind-Sonnen-Anteil auf karge 4,5 %. In der Schweiz sind es 2018 immerhin rund 20 %, aber trotz der vielen Wasserkraft kommt auch bei uns der Löwenanteil der Energie aus Erdöl und Erdgas. Den erneuerbaren Anteil bis spätestens 2050 auf 100 % hochzuschrauben, erscheint als fast unüberwindbare Herausforderung.

Schwierig, aber möglich

Nach heutigem Wissenstand ist 100 % erneuerbar aber möglich, auch wenn es alles andere als einfach wird. Zunächst braucht es einen Paradigmenwechsel im planerischen Denken. Das Rückgrat des traditionellen Stromnetzes ist eine überschaubare Anzahl von leistungsstarken Kraftwerken. Diese Kraftwerke liefern entweder konstant Strom oder sind flexibel steuerbar,

um Schwankungen in der Stromnachfrage auszugleichen. Ein erneuerbares Stromnetz funktioniert von Grund auf anders und ist aus zwei Gründen nur bedingt steuerbar.

- Erstens ist die Erzeugung **heterogen und grossflächig** verteilt (man denke an Photovoltaik: Von abertausend Kleinstanlagen auf Privatdächern bis zu flächendeckenden Grossanlagen ist alles möglich).
- Zweitens ist die erneuerbare Stromerzeugung stark **wetterabhängig und variabel**. Diese Wetterabhängigkeit oder Variabilität, und der Umgang mit ihr, ist der zentrale Knackpunkt.

Handeln oder horten?

Forscher auf der ganzen Welt haben ein immer besseres Verständnis dieser räumlichen und zeitlichen Variabilität erarbeitet. Diese Erkenntnisse sind für die Planung des erneuerbaren Stromsystems zentral. Es gibt prinzipiell zwei Wege, mit der Variabilität umzugehen.

- **Der erste Weg ist die geographische Ausdehnung.** Dass Wetter und Klima nicht überall gleich sind, lässt sich ausnutzen. Während im Sommer Solaranlagen im europäischen Süden ihre maximale Produktion errei-

chen, kommen im Winter die Windparks der windreichen Nord- und Ostsee in Höchstform. Das leuchtet intuitiv ein. Aber auch Grosswetterlagen, die Tage bis Wochen dauern, lassen sich nutzen: Wenn in der Nordsee Flaute herrscht, gibt es tendenziell an der Atlantikküste oder im Mittelmeer mehr Wind.¹ Auch in Bergregionen kann sich die Windkraft anders als in benachbarten Talgebieten verhalten.²

■ **Der zweite Weg ist die Stromspeicherung**, z.B. im Sommer Solarstrom für Schlechtwettertage und den Winter speichern. Für die Stromspeicherung über Stunden bis Tage werden vermutlich im grossen Massstab Batterien eingesetzt werden, für die Speicherung über Wochen und Monate am ehesten Wasserstoff.³ Durch die steigende Nachfrage und damit verbundenes Lernen und Effizienzsteigerungen sind die Kosten für Batterien stark am Sinken. Der gleiche Effekt wird beim Einsatz von Wasserstoff für die längerfristige Speicherung eintreten, wenn entsprechende Anlagen im grossen Massstab gebaut werden.

Technische und politische Entscheide sind eng verknüpft

Durchschnittlich übers Jahr gerechnet könnte vermutlich jedes europäische Land, darunter auch die Schweiz, genug erneuerbaren Strom produzieren.⁴ Doch die Variabilität macht alles komplizierter. In unserer Forschung untersuchen wir mit hochauflösenden Energiesystemmodellen, die europaweit Produktion und Verbrauch von Strom simulieren, wo Infrastruktur wie Kraftwerke, Leitungen und Speicher gebaut werden sollten. Um möglichst viel der erneuerbaren Variabilität abzubilden, füttern wir diese Modelle mit detaillierten europaweiten Simulationen zur stündlichen Stromproduktion von Wind- und Solarkraft, basierend auf mehreren Jahrzehnten historischer Wetterbedingungen.⁵

Eine Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass sehr unterschiedliche Systeme möglich sind. Es könnten Kraftwerke vor allem an optimalen Standorten gebaut werden, was einen grossen Übertragungsnetzausbau nötig machen würde. Der Bau von Wind- und Solaranlagen europaweit primär dort, wo Strombedarf ist, statt dort, wo die Wetterbedingungen optimal sind, ist aber auch möglich. Das wäre etwas teurer, bräuchte aber keinen grossen Ausbau des Übertragungsnetzes: Stattdessen wird das existierende Netz verwendet, um Variabilität europaweit auszugleichen.⁶

Möchte die Schweiz sich netto, also im Jahresschnitt, grösstenteils selbst mit Strom versorgen können? Sollen Solar- und Windanlagen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und an Berghängen errichtet werden? Sollen das europäische Übertragungsnetz und die Kraftwerke an den europaweit produktivsten und billigsten Standorten stehen? Wie wird mit einer «Dunkelflaute» umgegangen, einer tagelangen Schwachwindlage mit Bewölkung, wo weder Solaranlagen noch Windfarmen

Erneuerbare speichern oder handeln?

Zu welchem Grad auf Speicherung oder Handel gesetzt wird beeinflusst, wo in Europa (und der Schweiz) die erneuerbaren Kraftwerke stehen sollten, und wie viele Kraftwerke nötig sind. Schnell stellen sich dabei Fragen nach der Konkurrenz mit anderer Landnutzung und danach, ob es sinnvoll ist, die erneuerbare Stromproduktion vollständig im Inland zu konzentrieren.

Zum Beispiel sind Offshore-Windanlagen in der Nordsee fast doppelt so produktiv wie Windanlagen in der Schweiz. Die Internationale Energie-Agentur rechnet im jüngsten World Energy Outlook für Europa mit einem technischen Offshore-Wind-Potenzial in Küstennähe von fast 20'000 TWh/Jahr (dreimal so hoch, wenn küstenferne Standorte dazukommen) – mehr als genug, um für den Export zu produzieren.

viel Strom liefern: Mit Handeln oder Horten? Zwischen diesen beiden Extrempolen gibt es eine grosse Zahl möglicher Systeme. Nur eines kann aber gebaut werden. Um zu entscheiden welches, geht es letztlich nicht alleine um Fragen wissenschaftlicher und technischer Natur, sondern um politische Entscheide.

Neu erdachte Infrastruktur

Im Zeitraum 1950 bis 1980 hat sich der Verbrauch von Erdöl mehr als verzehnfacht. Den motorisierten Individualverkehr, wie wir ihn heute kennen, gab es zuvor nicht. Gleichzeitig mit dieser massiven Transformation entstanden auch Innovationen politischer Natur, wie beispielsweise die strategische Ölreserve, welche die Gefahr von Erpressung durch Ölexportiere vermindert.

Brauchen wir zukünftig eine strategische Stromreserve? Sicher ist, dass eine Transformation in der gleichen Grössenordnung bei den erneuerbaren Energien gefragt ist: Eine neu erdachte Infrastruktur, die mit der Variabilität von Wind, Sonne und Wasser umgehen kann. Der Systemwechsel ist nötig, damit wir unseren energieintensiven Lebensstandard aufrechterhalten können, ohne den Planeten unbewohnbar zu machen. Es ist keine einfache Aufgabe, doch nach momentanem Wissensstand sind die technischen Hürden überwindbar. <

¹ Christian M. Grams, Remo Beerli, Stefan Pfenninger, Iain Staffell, Heini Wernli (2017). Balancing Europe's wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes, in: *Nature Climate Change*.

² Bryn Pickering, Christian M. Grams, Stefan Pfenninger (2020). Sub-national variability of wind power generation in complex terrain and its correlation with large-scale meteorology, in: *Environmental Research Letters*.

³ Oliver Schmidt, Sylvain Melchior, Adam Hawkes, Iain Staffell (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, in: *Joule*.

⁴ Tim Tröndle, Stefan Pfenninger, Johan Lilliestam (2019). Home-made or imported: On the possibility for renewable electricity autarky on all scales in Europe, in: *Energy Strategy Reviews*.

⁵ www.renewables.ninja

⁶ Tim Tröndle, Stefano Marelli, Johan Lilliestam, Stefan Pfenninger (in review). Trade-offs between geographic scale, cost, and system design for fully renewable electricity in Europe, in: *Joule*.