aeesuisse

Dachorganisation der Wirtschaft für
erneuerbare Energien und Energieeffizienz

Bern, im August 2025

Positionen des Wissenschaftlichen Beirats der aeesuisse

Wie kann sich die Schweiz 2050 zuverlässig mit erneuerbarer Energie versorgen – und gleichzeitig die Treibhausgas-Emissionen auf Netto-Null reduzieren?

Zusammenfassung

- Die Schweiz möchte ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Netto-Null reduzieren. Dies erfordert einen grundlegenden Umbau des Energiesystems: weg von fossilem Öl und Gas in Gebäuden und Verkehr hin zu Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen.
- Die Kopplung des Wärme- und Verkehrssektors mit dem Stromsektor wird den Endverbrauch an Strom erhöhen; laut aktuellen Berechnungen von heute 50–60 TWh/a auf 70–80 TWh/a. Diese Zunahme und der Ersatz der Kernkraftwerke erfordern einen erheblichen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung. Der grösste Anteil wird von der Photovoltaik (PV) kommen, wobei die Windkraft vor allem für die Versorgung im Winter einen wichtigen Beitrag leisten kann und daher trotz Herausforderungen bei der Akzeptanz weiterverfolgt werden sollte.
- Die schwankende PV-Erzeugung muss ausgeglichen werden. Durch ein intelligentes Zusammenspiel von flexibler Wasserkraft, Energiespeichern (Batterien, Pumpspeicher), punktueller Abregelung der Erzeugung und flexibler Lasten (Ladestationen für E-Fahrzeuge, Wärmepumpen, industrielle Stromheizungen mit Wärmespeichern) kann die Photovoltaik gut integriert werden.
- Dies erfordert jedoch Anpassungen wie z. B. einen generellen Zugang zu dynamischen Stromtarifen sowie geeignete Planungsinstrumente, um die Flexibilität der Nachfrageseite zu integrieren.
- Saisonal erfolgt der Ausgleich von Stromverbrauch und -erzeugung durch Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK) und Stromimporte. Während in der Vergangenheit die Handelsbilanz zwischen Netto-Import und -Export schwankte, wird es in Zukunft tendenziell eher Netto-Stromimporte von 5–10 TWh geben. Ähnliche Werte wurden schon in den vergangen zwei Jahrzehnten in Import-dominierten Jahren erreicht. Der erfolgreiche Abschluss eines Stromhandelsabkommens mit der EU ist dafür entscheidend. Neue Grundlastkraftwerke sind nicht erforderlich.
- Durch die Sektorkopplung nehmen die Importe chemischer Energieträger wie Erdgas, Heizöl und Treibstoffe dramatisch ab. Waren es in den letzten Jahren 130–150 TWh/a (über eine Grössenordnung mehr als der Stromimport), werden in einem Netto-Null-Szenario nur noch 20–30 TWh/a benötigt – grösstenteils in Form erneuerbarer Flugtreibstoffe. Die Abhängigkeit der Schweiz von Energieimporten nimmt also deutlich ab.
- Weiterhin ist Effizienz die wichtigste «Energiequelle». Hier bleibt vor allem der Gebäudesektor hinter den Zielen zurück. Für die dringend nötige Erhöhung der energetischen Sanierungsrate sollten Massnahmen wie der Ersatz von Öl- und Gasheizungen durch

Wärmepumpen, Verbesserungen an der Gebäudehülle und andere marktreife Lösungen weiterhin gefördert werden.

- Diese Erkenntnisse beruhen auf einem weitgehenden Konsens der Schweizer Forschungsgemeinde, die sich im Rahmen der SWEET Projekte des Bundesamtes für Energie BFE organisiert haben. Ohne eine solche dauerhafte wissenschaftliche Unterstützung – von der Grundlagenforschung bis zur praktischen Anwendung – wird die Energiewende nicht gelingen.
- Eine generell positive Haltung zu Innovation wird uns helfen, die Herausforderungen von Netto-Null zu meistern. Dies betrifft die Regulierung wie z. B. flexible Stromtarife. Auch die Raumplanung ist von grosser Bedeutung, da viele neue Technologien naturgemäss Platz brauchen, z. B. alpine PV, Agri-PV oder grosse Erdbecken-Wärmespeicher. Auch die weit verbreitete «not-in-my-backyard» Einstellung hinsichtlich Stromtrassen, Windkraftanlagen usw. müssen wir überwinden.
- Unser zukünftiges Energiesystem muss robust sein. Es sollte also in verschiedenen Situationen – von ungehindertem Energiehandel bis hin zur Isolation in einer Krisensituation – sicher und kostengünstig funktionieren. Die beste Versicherung ist dafür der ungehinderte Zugang zu den europäischen Energiemärkten und eine Flotte von WKK-Anlagen, die mit flüssigen Energieträgern aus den strategischen Energiereserven betrieben werden. Frei nach dem Motto: «Hope for the best and prepare for the worst».

Der Wissenschaftliche Beirat der aeesuisse vertritt klar die Position, dass die Schweiz über sehr gute Voraussetzungen verfügt, um die Energiewende und das Netto-Null-Ziel bis 2050 zu schaffen. Sie wird zudem ihre Abhängigkeit von Energieimporten dramatisch reduzieren. Alle dafür nötigen Technologien sind verfügbar und bekannt. Entscheidend für die Umsetzung ist der politische und gesellschaftliche Wille.

Ausgangslage

Die Schweiz möchte bis 2050 ihre Treibhausgas-Emissionen auf Netto-Null reduzieren. Dies steht im Zentrum des Klima- und Innovationsgesetzes (KIG), welches am 18. Juni 2023 mit einem Ja-Stimmenanteil von 59.1 Prozent angenommen wurde[1]. Während Einigkeit über das Ziel herrscht, ist der Weg noch mit Unsicherheiten behaftet. Zentral ist dabei die Frage der sicheren Versorgung mit Energie: mit Strom[2], aber auch mit Brenn- und Treibstoffen, Biomasse und verschiedenen Wärmequellen wie Geothermie.

Die folgenden Positionen des Wissenschaftlichen Beirats der aeesuisse betrachten die sichere Versorgung der Schweiz mit Energie – Stunde für Stunde in einem typischen Jahr 2050 für ein Netto-Null Szenario. Sie beruhen auf dem aktuellen Wissenstand der Schweizer Forschung, die sich im Rahmen des SWEET-CROSS Projekts organisiert hat[3]. Die Problematik der internationalen und nationalen Stromnetze (auf Verteil- und Übertragungsebene) steht nicht im

[1] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050.html
[2] https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/stromversorgungssicherheit.html
[3] https://sweet-cross.ch/

Zentrum dieses Berichts. Der positive Effekt einer intelligenten Integration der Photovoltaik auf die Verteilnetze wird in den Modellergebnissen weiter unten skizziert.

Treibhausgas-Emissionen und Energieimporte

Zwischen 1990 und 2010 betrugen die Treibhausgas-Emissionen der Schweiz im Mittel 58 Mio Tonnen CO_2-Äquivalente (inkl. internationalem Flugverkehr, Abb. 1, links). Seit 2014 ist ein klarer Abwärtstrend zu erkennen, die Emissionen nehmen jährlich um ca. 1 Mio Tonnen ab. Der Grund ist der immer geringere Einsatz von Heizöl und Erdgas im Gebäudesektor; auch im Verkehrssektor geht der Verbrauch von Benzin und Diesel zurück. Auch in einer Netto-Null-Schweiz 2050 wird es jedoch noch Restemissionen in der Grössenordnung von jährlich 10–15 Mio Tonnen geben. Diese stammen aus den Sektoren Landwirtschaft, Industrie (insbesondere Zementherstellung) sowie Flugverkehr und müssen durch Massnahmen wie CO_2-Abscheidung und -Speicherung (CCS – CO_2 Capture & Storage) oder durch Negativemissions-Technologien vermieden bzw. kompensiert werden[4].

Der Abwärtstrend bei den CO_2 Emissionen spiegelt sich in der Abnahme der Importe fossiler Brenn- und Treibstoffe (Abb. 1, Mitte): Betrugen diese von 2000 bis 2010 durchschnittlich noch 175 TWh/a, zeigte sich ab 2014 eine jährliche Verringerung um 3–4 TWh. Dieser Trend wird sich fortsetzen müssen, damit die Schweiz das Netto-Null-Ziel erreicht. Die Importe von Benzin und Diesel werden nahezu auf null zurückgehen, wenn insbesondere der individuelle Personenverkehr grösstenteils elektrifiziert sein wird. Treibstoffbasierte Lösungen werden nur noch im Schwerlastverkehr oder in der Binnenschifffahrt eingesetzt. Ebenso werden Heizöl und Erdgas im Gebäudebereich verschwinden, Raumwärme und Warmwasser werden in erster Linie von Wärmepumpen bereitgestellt werden, ergänzt durch andere Energiequellen wie Solar- und Geothermie, Holz und Kehricht. Dabei werden letztere ebenso wie in der Schweiz produziertes Biogas v. a. für höherwertige Anwendungen wie industrielle Prozesswäre gebraucht werden. Auch die leitungsgebundene Wärmeversorgung wird an Bedeutung zunehmen – weiterhin aus Kehrichtverbrennungsanlagen aber immer mehr auch basierend auf Umweltwärme aus Luft, Gewässern und dem Untergrund mittels zentraler oder verteilter Wärmepumpen. Kerosin wird auch in Zukunft importiert werden, zunehmend in Form von synthetischem Treibstoff (Sustainable Aviation Fuels – SAF).

Abbildung 1 (Mitte) zeigt auch die jährliche Netto-Bilanz aus Stromimport und -export (letztere sind getrennt als graue Balken vermerkt, der reine Stromtransit ist dabei herausgerechnet). Der Vergleich mit den sonstigen Energieimporten zeigt klar, dass diese das Nettovolumen des Stromhandels weit übersteigen.

Folgerung 1 Eine Abhängigkeit der Schweiz von Energieimporten betrifft vor allem fossile Brenn- und Treibstoffe. Diese werden in einer Netto-Null-Schweiz drastisch zurückgehen.

Wieviel mehr Strom brauchen wir, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen?

Die weitgehende Elektrifizierung von Strassenverkehr und Gebäudewärme wird den Stromverbrauch erhöhen. Dies wurde in den Energieperspektiven 2050+[5] und im Rahmen des vom

[4] https://aeesuisse.ch/wp-content/uploads/2024/06/aeesuisse_WiBe_CCS_Position_24060859.pdf
[5] https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html

BFE finanzierten SWEET-CROSS[6] Projekts von zahlreichen Schweizer Forschungsteams quantifiziert. Die Modelle bilden den Schweizer Energiebedarf nach Verbrauchergruppen ab. In einem Optimierungsverfahren werden Kombinationen von Erzeugungstechnologien bestimmt, welche für die Deckung des Energiebedarfs unter Einhaltung der gesetzten Emissionsgrenzwerte die Erzeugungskosten minimieren. Für eine korrekte Bewertung des künftigen Stromverbrauchs und der Erzeugung ist eine Definition zentraler Grössen nötig. Abbildung 2 schlüsselt die Strombilanz als Wasserfalldiagramm exemplarisch für das Jahr 2023 auf:

- Die **Landeserzeugung** ist die Erzeugung aller Kraftwerke (Wasserkraft, Kernkraft, sonstige thermische Kraftwerke wie Kehrrichtverbrennungsanlagen, PV und Wind).
- Wird davon der Verbrauch der Pumpen in den Pumpspeicherkraftwerken abgezogen, ergibt sich die **Nettoerzeugung**.
- In jedem Jahr werden grosse Mengen an Strom importiert und exportiert. Wird dies in die Bilanz einbezogen, ergibt sich der **Landesverbrauch**.
- Werden davon die Netzverluste abgezogen, bleibt der **Endverbrauch**, der hier in die Kategorien Grundverbrauch (Beleuchtung, Motoren, IT usw.), Prozesswärme (industrielle Stromheizungen), Raumwärme & Warmwasser (Wärmepumpen, Stromheizungen) und Mobilität (Züge, E-Fahrzeuge) aufgeschlüsselt ist.

Wie Abbildung 3 (unten) zeigt, erreichte der Endverbrauch an Strom um 2010 einen Höhepunkt; seitdem nimmt er ab, dies v. a. durch Effizienzmassnahmen beim Grundverbrauch (Beleuchtung, Geräte usw.). Auch der Anteil ineffizienter Stromheizungen nimmt stetig ab (schraffierter Anteil der Raumwärme in Abb. 3). Die künftigen Szenarien zeigen einen Anstieg bei Raumwärme und Warmwasser aufgrund des zunehmenden Anteils von Wärmepumpen. Noch stärker fällt der Anstieg bei der E-Mobilität aus. In manchen Modellergebnissen erscheint auch die Wasserstoff-Elektrolyse (violett) als zukünftiger Treiber des Stromverbrauchs. Wasserstoff wird als Treibstoff oder zur Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt. Der mögliche zusätzliche Stromverbrauch durch Rechenzentren wird nur in der neuesten Studie des VSE mit 3 TWh/a berücksichtigt (Abb. 3, VSE-update). Allerdings ist dieser Anstieg zu gering, um die Kernaussagen der anderen Modelle signifikant zu beeinflussen.

Abbildung 3 (oben) zeigt die Nettoerzeugung. Dies verdeutlicht die Dominanz der Photovoltaik, die grössere Rolle von thermischen Kraftwerken, die mit Holz, Kehricht oder Biogas betrieben werden, sowie einen tendenziell höheren Nettoimport von Strom. In beiden Teilabbildungen ist zusätzlich der Landesverbrauch markiert. Es sei wieder darauf hingewiesen, dass die Frage, ob die Lastflüsse, insbesondere die Strom-importe und -exporte, von den Netzen bewältigt werden können, von den meisten Modellen nicht im Detail betrachtet werden. Nur das Nexus-e Modell[7] der ETH berechnet die Stromflüsse explizit auf der Ebene der Übertragungsnetze; dabei wurden für die Netto-Null-Szenarien keine Probleme festgestellt. Auf der Verteilnetzebene werden der PV-Ausbau und der erhöhte Strombedarf für E-Fahrzeuge die Belastung der Netze erhöhen. Dies kann jedoch durch geeignete Massnahmen entschärft werden[8]. Eine weitere Einschränkung betrifft den Flugverkehr, also die Bereitstellung von Kerosin. Dieser Aspekt wird noch nicht von allen Modellen adäquat berücksichtigt. Innerhalb

[6] https://sweet-cross.ch/
[7] https://nexus-e.org/
[8] Flexibility provision from electromobility and buildings, Synthesis Report, https://sweet-pathfndr.ch/

von SWEET-reFuel.ch[9] wird diese Frage näher betrachtet, insbesondere die Abwägung, ob nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuels – SAF) in der Schweiz hergestellt oder importiert werden sollten.

Folgerung 2 Die Ergebnisse der Schweizer Modellierungsteams zeigen, dass das Netto-Null-Ziel erreichbar ist. Entscheidend dafür ist die Elektrifizierung des Strassenverkehrs und der Wärmeversorgung in Gebäuden mittels Wärmepumpen. Diese Entwicklung wird die Importe fossiler Energie massiv reduzieren. Ein möglicher Anstieg der Stromimporte fällt im Vergleich dazu gering aus.

Sind diese Modellergebnisse plausibel? Eine einfache Abschätzung

Der künftige Stromverbrauch ist eine Grösse, die in Politik und Öffentlichkeit intensiv diskutiert wird. Die Berechnungen der Schweizer Forscherteams in Abbildung 3 zeigen einen klaren Trend: Der Endverbrauch an Strom wird von heute 50–60 TWh/a auf 70–80 TWh/a steigen, v. a. durch den höheren Verbrauch für E-Mobilität und Wärmepumpen. Diese Ergebnisse beruhen auf Modellen, von denen allerdings selbst die einfachsten kaum für Nicht-Spezialisten verständlich sind.

Eine einfache Abschätzung kann über eine Betrachtung des Endenergieverbrauchs erfolgen. Wie Abbildung 1 (rechts) zeigt, betrug dieser in den letzten Jahren etwas über 200 TWh/a, darunter die genannten 50-60 TWh/a Strom. Als Beispiel nehmen wir das Jahr 2023. Damals betrug der Endverbrauch insgesamt 213 TWh, davon 56 TWh Strom. Von den 213 TWh entfielen 55 TWh auf Benzin und Diesel sowie 37 TWh auf Heizöl und Gas für Raumwärme und Warmwasser. Würde nun der gesamte Strassenverkehr elektrifiziert, würden die 55 TWh Treibstoffe durch 18 TWh Strom ersetzt. Dies entspricht dem Übergang von 6 Liter/100 km auf 20 kWh/100 km. Ebenso würden die 37 TWh Brennstoffe durch 11 TWh Strom ersetzt, wenn Wärmepumpen mit einer Arbeitszahl von 3-4 eingesetzt werden. Ein letzter Aspekt ist der Ersatz von direkten Stromheizungen durch Wärmepumpen. Wie Abbildung 3 (unten) zeigt, werden 5 TWh Strom für Raumwärme und Warmwasser heute noch für elektrische Widerstandheizungen eingesetzt. Werden diese durch Wärmepumpen ersetzt, reduziert sich der Strombedarf um den gleichen Faktor 3–4, er sinkt also um etwa 3 TWh.

Es resultiert folgende Aufstellung: Wäre im Jahr 2023 auf einen Schlag der Endverbrauch für Benzin, Diesel, Heizöl, Gas und Stromheizungen durch effizientere E-Fahrzeuge und Wärmepumpen ersetzt worden, wäre der Endverbrauch an Strom von 56 TWh auf 82 TWh gestiegen.

	56	TWh	bisheriger Endverbrauch Strom
+	18	TWh	Ersatz fossil betriebener Fahrzeuge durch E-Fahrzeuge
+	11	TWh	Ersatz fossil erzeugter Raumwärme/Warmwasser durch Wärmepumpen
–	3	TWh	Ersatz Elektrowiderstandsheizungen durch Wärmepumpen
=	82	TWh	

Dieser Wert liegt am oberen Ende der deutlich fundierteren Modellrechnungen der Schweizer Forschergemeinde, sie bestätigt und plausibilisiert aber die Grössenordnung des Anstiegs.

[9] https://www.sweet-refuel.ch/

Diese einfache Abschätzung klammert andere Aspekte aus, die ebenso wichtig für das Erreichen des Netto-Null-Ziels sind, darunter v. a. die generelle Erhöhung der Effizienz bei Strom- und Wärmeverbrauch, das Erschliessen und den Ausbau weiterer Energiequellen wie Biogas, Solarthermie, Geothermie oder die Umnutzung wertvoller Ressourcen wie Holz und Kehricht für höherwertige Anwendungen für industrielle Prozesswärme. Auch der gesamte Komplex der Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO_2, die Erzeugung und Nutzung von Pflanzenkohle, der Holzbau und die Bedeutung all dieser Ansätze zur Erzeugung negativer Emissionen bleibt den komplexeren Modellen vorbehalten. In diese fliessen u. a. Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung, zu Wohlstand und Lebensstil sowie zum Umfang des Dienstleistungssektors und der industriellen Produktion inklusive deren Struktur und Effizienzentwicklung ein.

Folgerung 3 Gemäss heutigem wissenschaftlichen Konsens wird der Endverbrauch an Strom in einer Netto-Null-Schweiz durch die Elektrifizierung des Strassenverkehrs und der Wärmeversorgung im Gebäudebereich von heute 50–60 TWh/a auf 70–80 TWh/a steigen.

Sind diese Szenarien robust? Oder funktioniert Netto-Null nur bei schönem Wetter?

Die Abhängigkeit der Schweiz von Energieimporten wird dramatisch zurückgehen. Dennoch ist die Schweiz auch in den CROSS-Szenarien keine Insel. Ein funktionierender Stromhandel und auch die Möglichkeit, Energieträger wie Methan, Wasserstoff, Diesel und Kerosin – fossil, biogen oder synthetisch – einzuführen, ist noch immer vorgesehen. Ein berechtigter Einwand ist: Was passiert, wenn solche Importe in manchen Jahren nicht möglich sind? Wenn in ganz Europa eine Dunkelflaute herrscht? Wenn Gas- oder Ölimporte durch internationale Krisen oder Kriege zum Erliegen kommen? Dabei ist nicht unbedingt die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse entscheidend, sondern eher die möglicherweise dramatischen Auswirkungen und die Massnahmen, um sich proaktiv darauf vorzubereiten.

Energiesystemmodelle, wie sie in CROSS zum Einsatz kommen, können helfen, solche Fragen zu beantworten. Die folgenden Ergebnisse wurden mit dem Swiss Energyscope Modell der ETH erzeugt[10]. Statt das Energiesystem nur für ein bestimmtes künftiges Jahr zu optimieren, in dem z. B. Stromimporte möglich oder eben eingeschränkt sind, wird ein System für mehrere Jahre parallel ausgelegt. Das optimale System ist also dasjenige, das am besten mit mehreren möglichen Situationen zurechtkommt.

In diesem Fall wurden drei verschiedene künftige Jahre – oder Szenarien – definiert (s. Abb. 4):

A Alle Energieimporte sind uneingeschränkt verfügbar. Dies ist ein wünschenswertes und mit Abschluss eines Stromabkommens auch realistisches Szenario.

B Von November bis Februar sind keine Stromimporte oder -exporte möglich. Dies nimmt eine extreme Dunkelflaute an, also die Befürchtung, dass unsere Nachbarn im Winter ihren Strom selbst benötigen.

C Der gesamte Energiehandel (bis auf Kerosin) ist das ganze Jahr unterbrochen. Eine solche Situation würde nur bei einer extremen Krisensituation, z. B. einem ausgedehnten Krieg in Europa, auftreten.

[10] https://sweet-cross.ch/catalog/model/seseth

Bei der Optimierung wird jedes Szenario gewichtet nach der Eintretenswahrscheinlichkeit: Nimmt man 10 künftige Jahre an, entsprächen 7 Jahre dem Szenario A, 2 Jahre dem Szenario B und ein Jahr dem extremen Krisenszenario C. Die Reihenfolge, in der sich diese Jahre abwechseln, ist für die Modellierung nicht von Bedeutung. Es sei klar darauf hingewiesen, dass dies ein äussert düsteres Bild der Zukunft ist. Dennoch sind solche Betrachtungen wichtig, da sie die Sorgen von Bevölkerung und Politik aufgreifen. In den nachfolgenden zwei Abschnitten werden die Ergebnisse im Detail betrachtet: zuerst hinsichtlich der Photovoltaik im Sommer, dann für die Stromversorgung im Winter.

So wird die Photovoltaik in das Energiesystem integriert

Der Übergang von einer planbaren Stromerzeugung basierend auf Kern- und Wasserkraft hin zu einem Mix aus Wasserkraft, Photovoltaik und Wind ist eine Herausforderung. Im Gesamtpaket mit der Elektrifizierung von Wärme und Verkehr liegt allerdings auch die Lösung.

Abbildung 5 zeigt Stromerzeugung und -verbrauch an einem Sommertag der drei typischen Jahre 2050, also von (A) freiem Energiehandel bis zu (C) Isolation (s. Abb. 4 und den vorhergehenden Abschnitt). Dabei wurden zwei Varianten betrachtet, die sich hinsichtlich der Bereitschaft unterscheiden, neue Technologien einzusetzen. In der Variante «innovativ» wird ein verstärkter Ausbau von Wasserkraft, Windkraft, alpiner PV und Geothermie angenommen, zudem eine erhöhte Effizienz im Gebäudesektor, eine intensivere Verwendung von Biomasse zur Erzeugung von Biogas oder Biodiesel sowie die Verfügbarkeit von saisonalen Wärmespeichern. In der Variante «konservativ» stehen diese Technologien nicht zur Verfügung.

Es zeigt sich für alle Szenarien, dass die kumulierte erneuerbare Stromerzeugung aus Wasserkraft und Photovoltaik usw. den Grundverbrauch für Beleuchtung, Motoren, IT usw. (grün) deutlich übersteigt. Dies wird jedoch durch verschiedene Massnahmen kompensiert:

(1) Die Spitzenleistung wird abgeregelt. In Abbildung 5 beträgt die installierte DC-Leistung für die Variante «innovativ» ca. 30 GW. Die tatsächlich erzeugte AC-Spitzenleistung ist aber nur 20 GW (dies liegt v. a. daran, dass Wechselrichter üblicherweise unterdimensioniert sind – engl. Clipping losses). Davon werden nochmals 10-15 % der Leistung bewusst abgeregelt, womit aber nur 1–2 % des Energieertrags verloren gehen. Diese Massnahme reduziert die Belastung der Verteilnetze erheblich. Eine solche Abregelung ist das Ergebnis einer ökonomischen Optimierung. Es wäre teurer, jede erzeugte GWh an PV-Strom nutzen zu wollen, da die dafür nötigen Geräte, z. B. Speicher, und Netze entsprechend grösser dimensioniert werden müssten und sie diese Grösse nur an wenigen Stunden im Sommer ausnutzen könnten.

(2) Die Speicherkraftwerke fahren tagsüber herunter und produzieren v. a. in der Nacht. Dies kann selbstverständlich nur im Rahmen der Anforderungen des Gewässerschutzes erfolgen. Eine mögliche zusätzliche Massnahme sind Speicherbecken, die einen Wasserfluss auch während des Tages garantieren können. Auch Grossbatterien am Standort der Wasserkraftwerke können dafür einen Beitrag leisten.

(3) E-Fahrzeuge werden v. a. während des Tages geladen, am besten zwischen 6 und 18 Uhr.

(4) Die Erzeugung von Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser erfolgt verstärkt tagsüber; mit Wärmespeichern kann die Wärme über den ganzen Tag genutzt werden.

(5) Stromspeicher (Batterien, Pumpspeicherkraftwerke) werden während der Mittagszeit geladen und nachts entladen. Vor allem Batterien, die nahe an der Erzeugung platziert

werden, können erheblich zur Netzentlastung beitragen – und werden aufgrund rasanter Fortschritte immer günstiger.

(6) Zudem wird während des ganzen Tages Strom importiert und exportiert. Da der Grosshandelspreis (durch Solarenergie getrieben) tendenziell tagsüber niedriger sein wird als nachts, wird tagsüber (v. a. vormittags and nachmittags) günstiger Strom importiert. Dagegen wird nachts, wenn der Strom wertvoll ist, wieder exportiert, dies v. a. durch das Hochfahren der regelbaren Speicherkraftwerke und durch das Entladen der Stromspeicher.

Die Szenarien mit eingeschränktem Stromhandel (B bis C) unterscheiden sich an diesen Sommertagen nicht sehr von dem des freien Stromhandels (A). Die Variante «konservativ» zeigt, dass für eine zunehmende Isolation der Stromverbrauch für Elektrolyse (Power-to-H_2) zunimmt. Diese folgt jedoch nicht der PV-Erzeugung. Vielmehr findet ein Ausgleich über Stromspeicher statt, was einen konstanten Betrieb der Elektrolyse bei konstanter Last erlaubt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass mögliche Probleme auf Verteilnetzebene von den hier betrachteten Modellen nicht im Detail betrachtet werden.

Eine weitere Einschränkung der Modellergebnisse muss erwähnt werden: 2050 sind alle zuvor genannten Elemente des Energiesystems aufeinander abgestimmt. Diese werden sich jedoch in der Übergangsphase in unterschiedlicher Geschwindigkeit entwickeln. Wenn z. B. die Photovoltaik schneller wächst als das Flexibilitätsangebot durch Batteriefahrzeuge, Wärmepumpen und Stromspeicher kann sich ein Überangebot ergeben, das zu negativen Preisen und/oder verstärkten Abregelungen führt.

Dies erfordert jedoch Anpassungen wie z. B. einen generellen Zugang zu dynamischen Stromtarifen sowie geeignete Planungsinstrumente, um die Flexibilität der Nachfrageseite zu integrieren.

Folgerung 4 Insgesamt zeigt der Fall eines typischen Sommertages, dass ein koordiniertes Zusammenspiel aller Komponenten des Energiesystems in der Lage ist, die PV-Erzeugung sinnvoll zu nutzen. Photovoltaik, Wasserkraft, E-Mobilität, Wärmepumpen, Speicher und Stromhandel sind das «Dream Team» der zukünftigen Netto-Null-Schweiz.

Und so stellen wir im Winter jederzeit genügend Strom zur Verfügung

Abbildung 3 (oben) zeigt, dass in den kostenoptimalen Netto-Null-Szenarien die Erzeugung von Photovoltaik, Windkraft und Wasserkraft allein den Strombedarf nicht deckt. Diese Unterdeckung betrifft vor allem das Winterhalbjahr. Der benötigte Strom wird durch Importe und thermische Kraftwerke bereitgestellt. Letztere kommen in verschiedenen Varianten vor, die wahlweise mit Erdgas, Biomethan, flüssigen Brennstoffen oder auch Wasserstoff betrieben werden. Diese Energieträger werden importiert oder zum Teil in der Schweiz produziert. Tendenziell erreichen diese thermischen Kraftwerke mehrere tausend Betriebsstunden in den Wintermonaten; sie sind also keine reinen Backup-Lösungen für den Notfall.

Dies ist kein Designfehler, sondern die kostenoptimale Lösung. Die Schweiz könnte sich auch 2050 in der Jahresbilanz komplett allein mit Strom versorgen, allerdings wäre dies teurer und nicht unbedingt sicherer. Abbildung 1 (Mitte) zeigt, dass es in 8 der vergangenen 23 Jahre effektiv einen Importüberschuss gab, dass also in diesen Jahren in der Summe mehr Strom importiert als exportiert wurde. In der Spitze erreichte der Importüberschuss 2005 einen Wert

von 6.3 TWh, 2017 waren es 6.0 TWh. In letzterem Fall wurden über das Jahr 11 TWh importiert und 5 exportiert (der reine Stromtransit ist dabei nicht berücksichtigt). Tatsächlich fand der Grossteil des Imports im Winterhalbjahr statt, während im Sommer exportiert wurde. Die Nettoimporte, die sich in Abbildung 3 (oben) für künftige Szenarien ergeben, betragen im Mittel 5–10 TWh/a, was in einer ähnlichen Grössenordnung liegt.

Abbildung 5 zeigt typische Wintertage, wieder für die Varianten «innovativ» und «konservativ». In den Jahren, in denen Stromhandel uneingeschränkt möglich ist (A), findet dieser ebenso wie im Sommer statt. Importiert wird tagsüber, exportiert eher in der Nacht. Auch die Wasserkraft zeigt den typischen Tag-Nacht-Wechsel. Der sichtbare Unterschied liegt in der deutlich geringeren PV-Erzeugung, daher spielt auch die Stromspeicherung kaum eine Rolle. In Jahren, in denen der Stromhandel eingeschränkt und schliesslich ebenso wie die sonstigen Importe unterbunden wird (B bis C), steigt die Erzeugung thermischer Kraftwerke.

Die Sommer/Winter-Dynamik von Stromerzeugung und Verbrauch kann auch mittels Wasserfalldiagrammen visualisiert werden. Abbildung 6 zeigt dies für Sommer und Winter, für die drei Szenarien (A bis C) und die zwei Varianten «innovativ» und «konservativ». Der Vergleich der Winterbilanz für Jahre mit uneingeschränktem Stromhandel (A) zwischen den Varianten «konservativ» und «innovativ» zeigt, dass im ersten Fall der Nettoimport im Winter ca. 10 TWh beträgt ①. Dieser Wert fällt für die Variante «innovativ» auf 5 TWh ②. Importe können also durch Entscheidungen, die in unserer Macht liegen, markant reduziert werden. Hier sind v. a. der Ausbau der Wasserkraft, die Erhöhung von Staumauern, die alpine PV und die Windkraft zu nennen, aber auch Innovationen im Bereich der Wärmeversorgung, z. B. grosse thermische Langzeitspeicher und Niederhub-Wärmepumpen mit regenerierten Erdsondenfeldern.

Wie aber kommt das künftige Energiesystem in Jahren zurecht, in denen Stromimporte im Winter (B) oder sogar alle Energieimporte bis auf Kerosin (C) unterbrochen sind? Die Antwort findet sich wieder in Abbildung 6: Werden die Stromimporte in den Monaten November bis Februar unterbunden (B), steigt die Erzeugung von thermischen Kraftwerken, genauer gesagt von industriellen WKK-Anlagen, die Strom und gleichzeitig Wärme liefern ③. Gleichzeitig sinkt der Verbrauch durch industrielle Stromheizungen ④, da der Bedarf für industrielle Prozesswärme nun von den WKK-Anlagen geliefert wird. Diese Verschiebung setzt sich fort bis zu den Jahren, in denen der Energiehandel komplett unterbrochen ist (C). Betrieben werden diese WKK-Anlagen mit flüssigen Energieträgern (möglichst biogen oder synthetisch), da diese als einzige günstig über Jahre gelagert werden können. Zu einem sehr ähnlichen Schluss kommt eine aktuelle Studie der ETH Zürich und der ZHAW[11].

Folgerung 5 Unsere Modellergebnisse zeigen die Grundzüge eines Energiesystems, mit dem wir unsere Klimaziele erreichen und das gleichzeitig robust genug ist, um mit verschiedenen Krisenszenarien umgehen zu können. Neben dem Ausbau von PV und Windkraft, der Elektrifizierung von Wärmeversorgung und Strassenverkehr und sonstigen Innovationen wie Geothermie oder verstärkter Biogas-Erzeugung ist v. a. der freie Handel mit Energie (Strom, gasförmige und flüssige Energieträger) von entscheidender Bedeutung. Versorgungssicherheit – auch in Krisensituationen – entsteht dabei durch thermische Kraftwerke, die im Notfall mit flüssigen Energieträgern aus den strategischen Energiereserven betrieben werden.

[11] https://www.econstor.eu/handle/10419/306555

Abbildungen

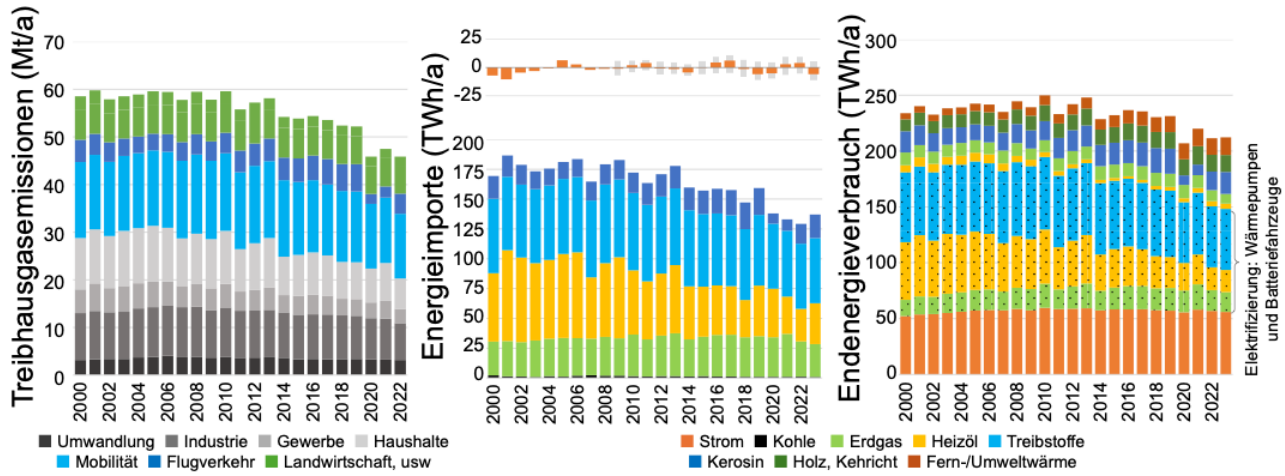


Abb. 1 Historische Treibhausgasemissionen (links), Energieimporte (Mitte), Endenergieverbrauch (rechts) der Schweiz

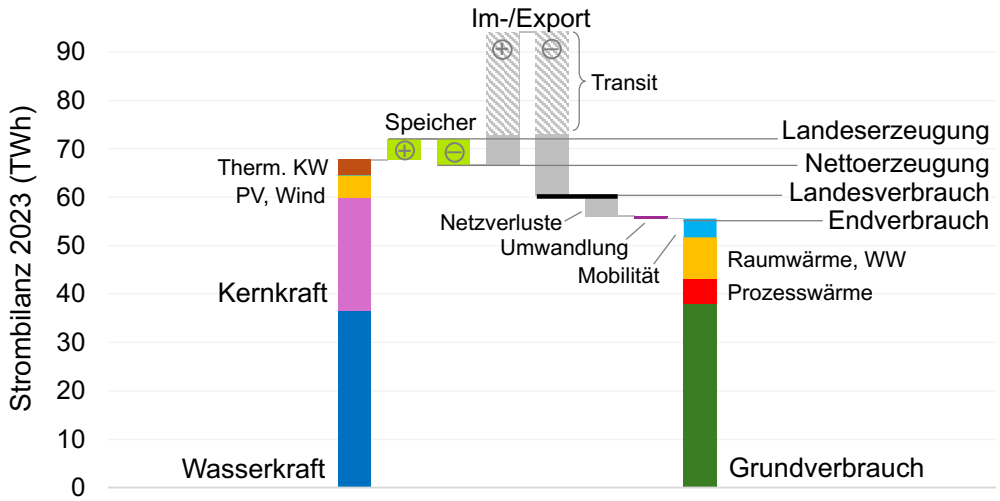


Abb. 2 Strombilanz 2023; Definition wichtiger Grössen

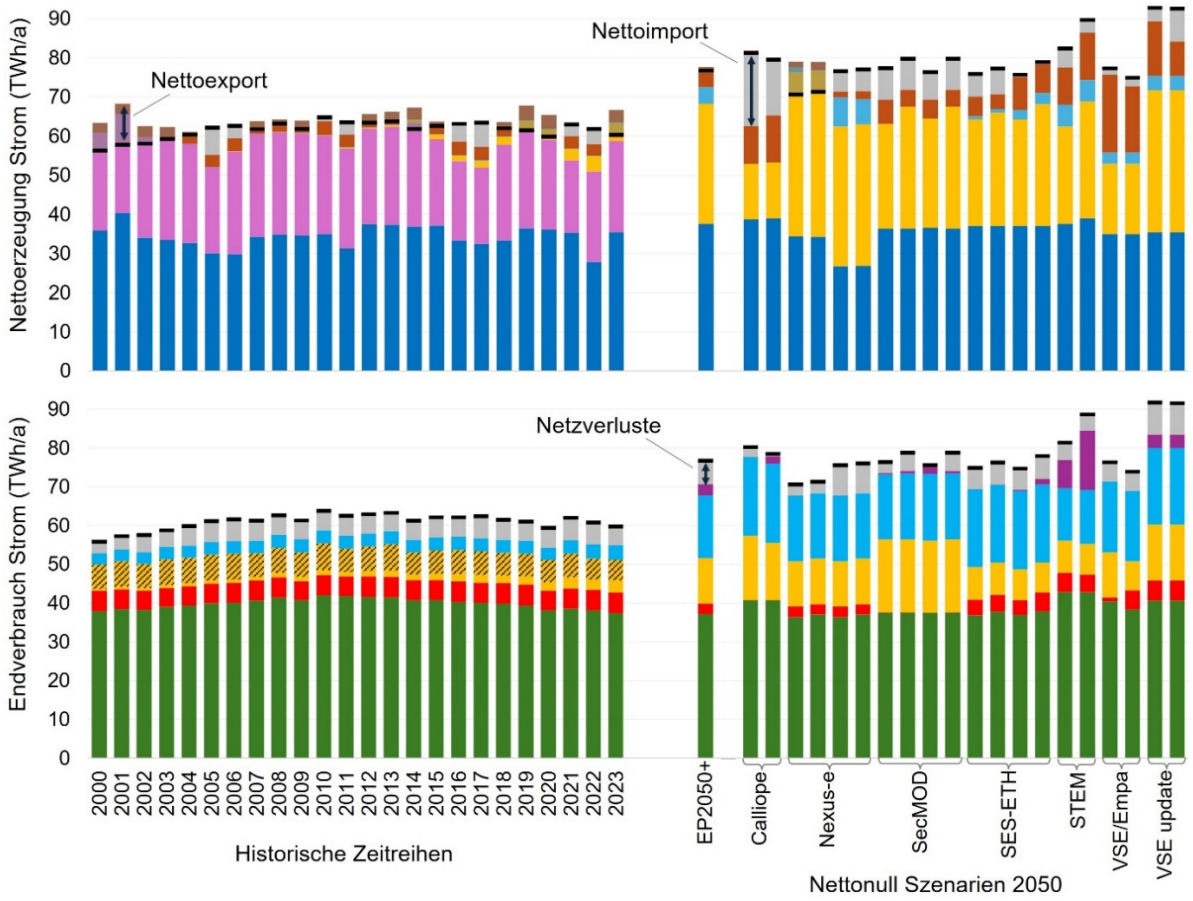


Abb. 3 Nettoerzeugung und Endverbrauch von Strom historisch und 2050. Die beteiligten Forscherteams sind von der TU Delft (Calliope[12]), der ETH (Nexus-e[13], SES-ETH[14], SecMOD[15]), vom PSI (STEM[16]), von der Empa (ehub-x[17]) und vom VSE[18]; Erzeugung: Wasserkraft, Kernkraft, Photovoltaik, Wind, Thermische Kraftwerke, Stromhandel; Verbrauch: Netzverluste Umwandlung, Mobilität, Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme, Grundbedarf

[12] https://sweet-cross.ch/catalog/model/callliope
[13] https://sweet-cross.ch/catalog/model/nexuse
[14] https://sweet-cross.ch/catalog/model/seseth
[15] https://sweet-cross.ch/catalog/model/secmod
[16] https://sweet-cross.ch/catalog/model/stem
[17] https://sweet-cross.ch/catalog/model/ehub
[18] https://www.strom.ch/de/energiezukunft-2050/startseite

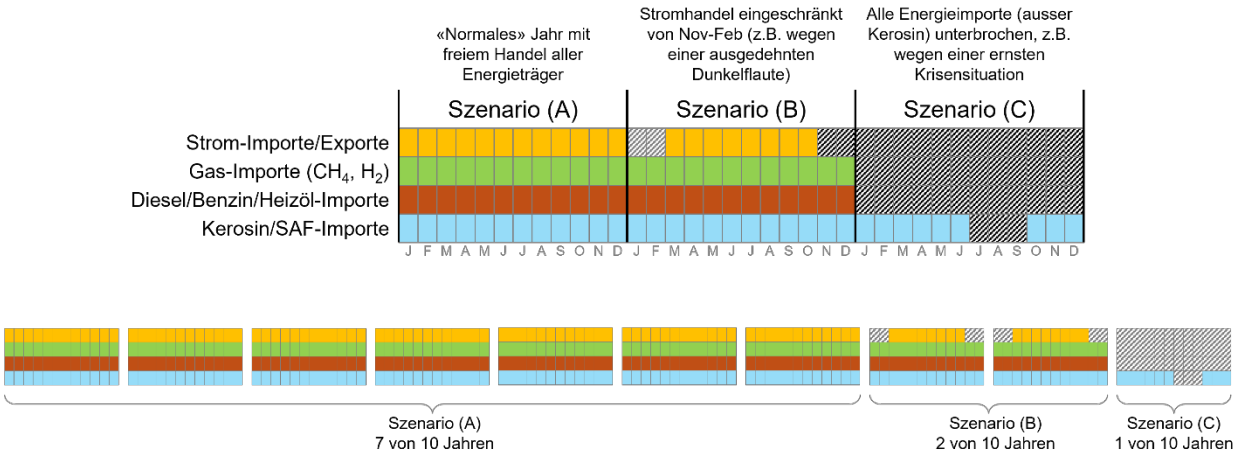


Abb. 4 Definition von Szenarien für die robuste Optimierung

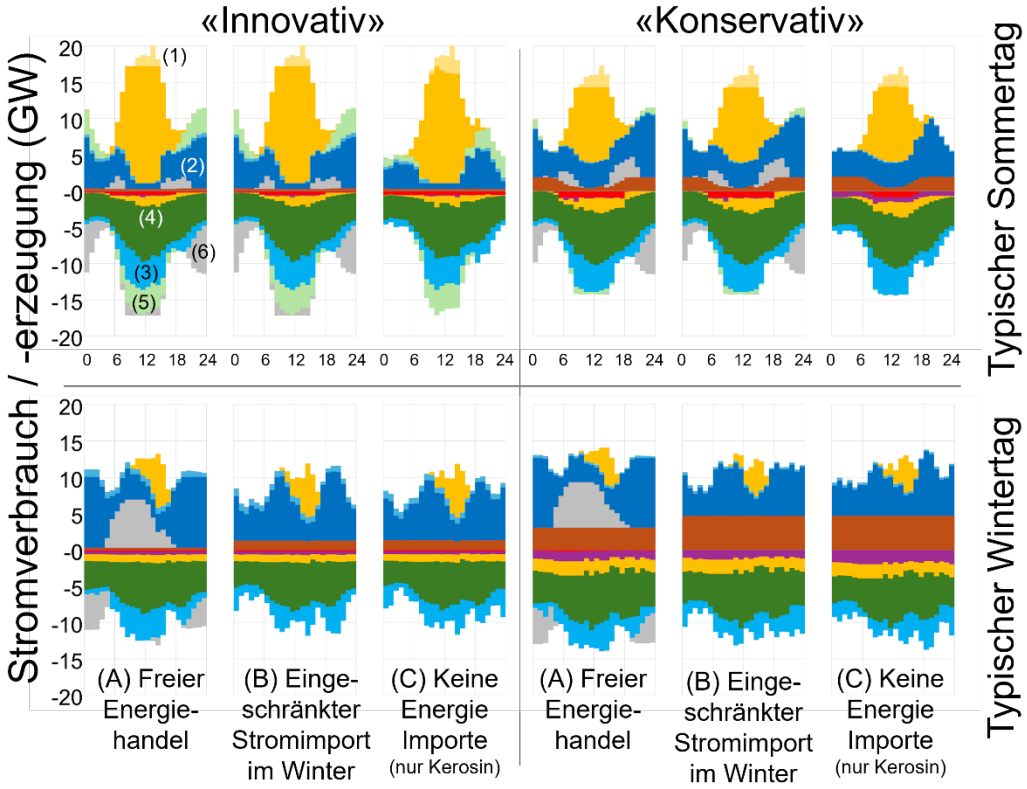


Abb. 5 Stündliche Stromerzeugung und -verbrauch; Photovoltaik, Wind, Speicher, Wasserkraft, Stromhandel, Thermische Kraftwerke, Prozesswärme, Umwandlung, Raumwärme, usw, Grundbedarf/Netzverluste, Mobilität

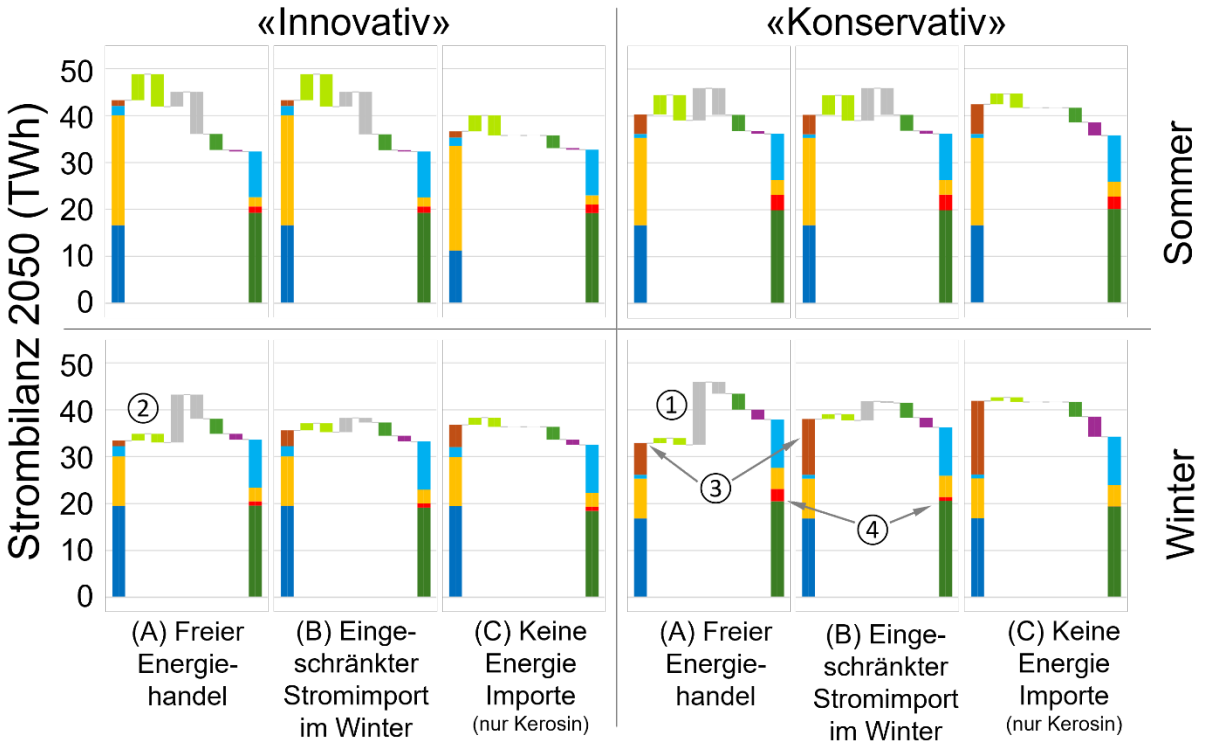


Abb. 6 Strombilanzen für Winter und Sommer; Photovoltaik, Wind, Speicher, Wasserkraft, Stromhandel, Thermische Kraftwerke, Prozesswärme, Umwandlung, Raumwärme, usw., Grundbedarf/Netzverluste, Mobilität

aeesuisse

Dachorganisation der Wirtschaft für
erneuerbare Energien und Energieeffizienz



Prof. Dr. Luca Baldini
Sprecher des Wissenschaftlichen Beirats der aeesuisse
Co-Leiter des Institute for Building Technology and Process IBP an der ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften



Prof. Dr. Christophe Ballif
Direktor PV-Lab@EPFL und Sustainable Energy Center@CSEM



Prof. Dr. Massimiliano Capezzali
Leiter des Instituts für Energien der Fachhochschule für Wirtschaft und Ingenieurwissenschaften des Kantons Waadt (HEIG-VD)



Dr. Gianfranco Guidati

Stellvertretender Direktor des Energy Science Center der ETH Zürich



Prof. Dr. Andreas Häberle
Institutsleiter des SPF Institut für Solartechnik, Leiter der Abteilung EEU Erneuerbare Energien und Umwelttechnik der OST – Ostschweizer Fachhochschule



Prof. Dr. Martin Patel
Professor am Lehrstuhl für Energieeffizienz an der Universität Genf



Prof. Dr. Greta Patzke
Professorin am Departement für Chemie der Universität Zürich



Dr. François Vuille
Directeur de l'énergie du Canton de Vaud und ehemaliger Executive Director des Energy Center der EPFL

Der Wissenschaftliche Beirat der aeesuisse

Der Wissenschaftliche Beirat wirkt als Think Tank und Reflexionsgruppe für die politische und inhaltliche Arbeit der aeesuisse in sämtlichen Bereichen der Energie- und Klimapolitik. Im Beirat sind namhafte Akademikerinnen und Akademiker engagiert. Sie verfügen über internationale Reputation sowie ein nationales und internationales Netzwerk.

Der Wissenschaftliche Beirat hat drei Kernaufgaben:

- Expertise: Der Wissenschaftliche Beirat reflektiert aktuelle Entwicklungen und generiert Input bei der Erarbeitung und Klärung von Positionen und Inhalten.
- Kommunikation: Er beteiligt sich aktiv an der öffentlichen und politischen Meinungsbildung in Form von Fachartikeln, Auftritten an Veranstaltungen und Kontakten zu Politikern und Behörden.
- Netzwerk: Er pflegt und baut sein Netzwerk aus und unterstützt damit die positive Positionierung der aeesuisse in Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft.