



Die Power-Tower Challenge

Baue die
Energiezukunft
der Schweiz



Die Power-Tower Challenge

Spielend die Energiezukunft der Schweiz gestalten

Inhalt

Die Challenge kurz erklärt	2
Übersicht über die Bausteine für den Power-Tower	6
Faktenblätter zu den 20 Optionen für die Energieproduktion	7
Methodik	22



Die Power-Tower Challenge

Spielend die Energiezukunft der Schweiz gestalten

Wozu die Power-Tower Challenge?

Die Schweizer Bevölkerung will den Ausstoss von Treibhausgasen unter dem Strich stoppen. Dies hat sie mit der Annahme des Klimagesetzes im Juni 2023 bekräftigt. Zentral für eine CO₂-neutrale Schweiz ist der Abschied von Heizöl, Gas, Benzin und Diesel. In der Folge wird es mehr Strom brauchen für Elektroautos und für Wärmepumpen, die unsere Häuser heizen. Zudem müssen die alten AKW bald aus Sicherheitsgründen abgestellt werden. Nach dem Volkswillen wird es keine neuen geben.

Trotzdem brauchen wir auch künftig eine sichere Stromversorgung. Wie diese Energiezukunft aussehen wird, können und müssen wir schon heute gestalten: Wie viele Dächer statten wir mit PV-Modulen aus? Bauen wir die Windkraft deutlich aus? Wollen wir den bereits intensiv genutzten Schweizer Gewässern noch mehr Energie abtrotzen? Das grosse Potenzial an Stromsparmöglichkeiten nutzen oder die AKW mit viel Geld nachrüsten, ohne dass klar ist, wie lange sie dadurch tatsächlich noch laufen können?

Wir haben viele Optionen, die Energiezukunft zu gestalten, gratis wird aber keine sein. Alle fordern ihren Preis – in Franken, in bebauter Fläche, in direkten oder grauen CO₂-Emissionen, in Auswirkung auf die Biodiversität. Dieses Kostenprofil ist für jede Option anders; die Mischung an Optionen bestimmt, wie hoch die Gesamtrechnung für Mensch und Umwelt schlussendlich ausfallen wird.

Der Power-Tower macht diese Abwägung sicht- und greifbar: Baue einen Turm, der den künftigen Strombedarf der Schweiz deckt. Er muss dafür je nach Szenario 22 oder 28 Bausteine hoch sein – welche der 63 verfügbaren Bausteine Du dafür verwendest, ist Deine Entscheidung.

Dein fertiger Power-Tower legt offen, wie viel Deine Entscheidungen kosten – die Stromkonsument:innen und Steuerzahler:innen, das Klima und die Biodiversität.



Welches wissenschaftliche Fundament hat die Power-Tower Challenge?

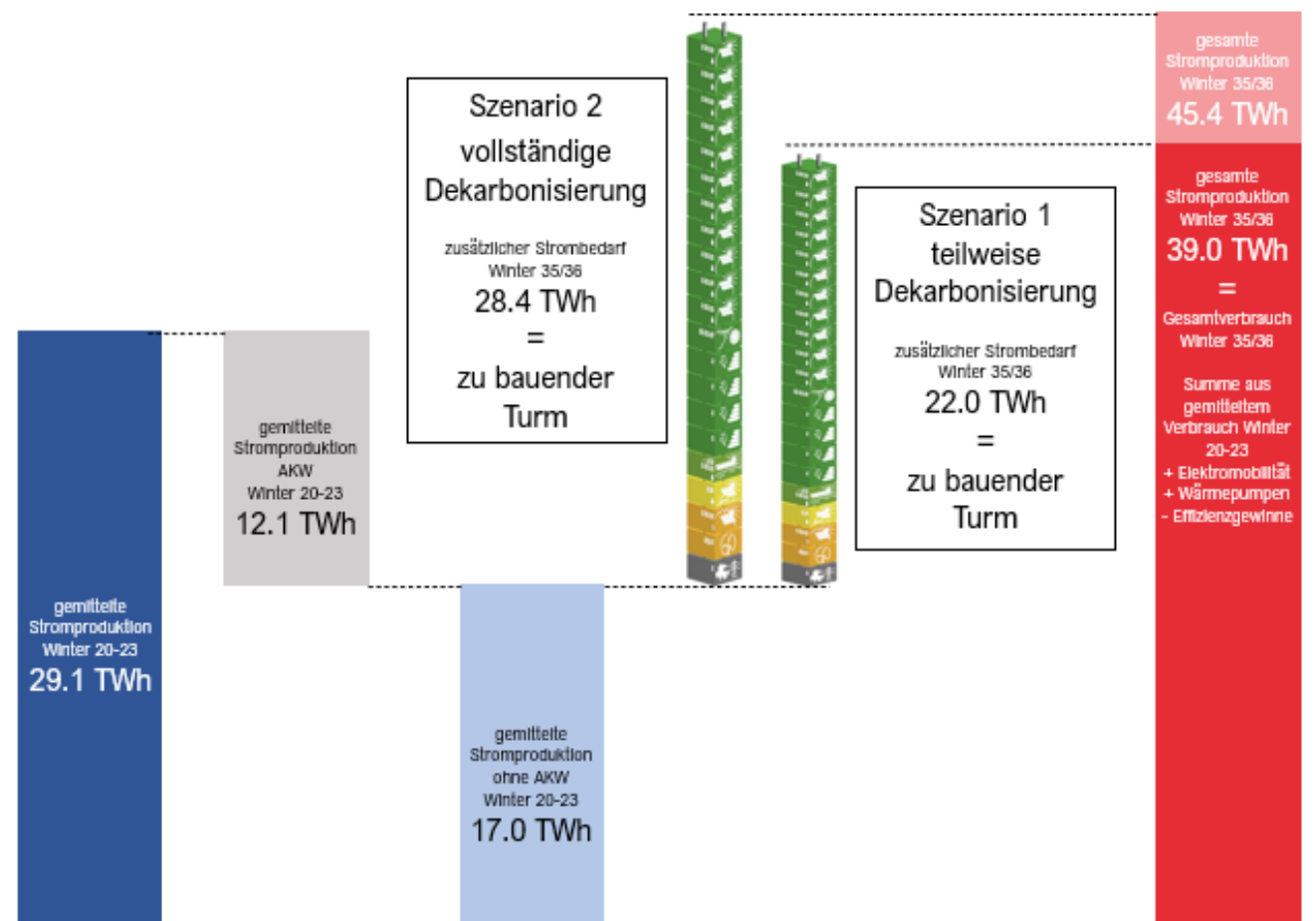
In erster Linie geht es bei diesem Spiel darum, die Konsequenzen unserer Entscheidungen bei der Energieproduktion auszuloten. Ob der Strombedarf der Schweiz künftig fünf Prozent höher oder tiefer liegt oder ob sich bis in zwölf Jahren 30 oder 35 Gigawatt an PV-Leistung auf Gebäuden zubauen

lassen, ist dafür nicht matchentscheidend. Trotzdem basiert das Spiel auf sorgfältigen Abschätzungen. Details dazu findest Du in den Faktenblättern zu den Energie-Optionen und im Methodenteil¹.

Höhe und Fertigstellung des Turms: Die Höhe des Power-Towers symbolisiert die Menge an Strom, die wir in der Schweiz bis im Winter 2035/36 zusätzlich zu dem produzieren müssen, was die Kraftwerke heute bereits liefern – allerdings ohne den Strom aus den AKW. Diese werden bis dann nach jeweils maximal 50 Betriebsjahren stillgelegt sein². Bis etwa 2035 sollte die Schweiz aus wissenschaftlicher Sicht eine CO₂-neutrale Stromversorgung haben³. Der Winter steht im Fokus, weil in dieser Jahreszeit der Strombedarf in der Schweiz schon heute höher ist als die inländische Produktion. Es braucht also Importe und die Herausforderung für die Versorgungssicherheit ist grösser als im Sommer.

Der geschätzte künftige Bedarf basiert auf dem gemittelten Verbrauch der drei Winterhalbjahre 2020/21-2022/23 plus dem, was durch den Ausstieg aus den fossilen Energien bis 2035 dazu kommt, vor allem durch Elektroautos und Wärmepumpen. Wir haben dafür zwei Szenarien verwendet: Eines widerspiegelt die Klima- und Energiepolitik, die dem kürzlich angenommenen Klimagesetz zugrunde liegt. Das andere rechnet damit, dass die Schweiz ihrer Verantwortung gerecht wird und bis 2035 vollständig aus den fossilen Energien aussteigt.

Um den Bedarf beider Szenarien zu decken, kann man die heutige Schweizer Stromproduktion nutzen (ohne den AKW-Park) und füllt die Lücke zum geschätzten Verbrauch im Jahr 2035 mit dem Power-Tower. Er muss dafür 22 resp. 28 TWh hoch werden:




¹ Wesentliche Mitarbeit: Econcept AG, Alexander Umbricht, MSc ETH in Umwelt-Natw., MAS ETH in MTEC, David Schärer, MSc ETH in Umweltnaturwissenschaften, Valentin Delb, Dipl. Ing. ETH

² Das jüngste Schweizer AKW – Leibstadt – erreicht im Jahr 2034 die geplante Laufzeit von 50 Jahren.

³ EBP. CO₂-Budget der Schweiz. Kurzbericht. 2017

Die Bausteine des Turms – die Energieoptionen: Es gibt viele Arten, Strom zu produzieren. Wir haben für eine grosse Auswahl davon das Potenzial abgeschätzt, das bis 2035 in der Schweiz ausgeschöpft werden könnte, wenn Gesellschaft, Politik und Wirtschaft dies wollen. Dazu die Kosten, die CO₂-Emissionen durch Bau und Betrieb und die Auswirkungen auf die Biodiversität. Bei manchen Optionen spielt es eine grosse Rolle, wo eine Produktionsanlage gebaut wird – zum Beispiel bei PV-Anlagen im alpinen Raum, bei Wasserkraftanlagen und bei Windrädern. In solchen Fällen haben wir diese Optionen in zwei Varianten aufgeteilt: sogenannte High- und Low-impact-Varianten.

- Jeder Baustein für den Power-Tower entspricht einer Menge Strom von einer Terawattstunde (1 TWh). Je nach Potenzial gibt es für eine Energieoption einen oder mehrere Bausteine.
- Die Kosten werden durch \$-Zeichen symbolisiert – von \$ bis \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$.
- Der CO₂-Ausstoss wird mittels  ebenfalls in zehn Kategorien eingeteilt.
- Die Auswirkung auf die Biodiversität ist in sieben Kategorien eingeteilt und wird analog zur bekannten Energie-Etikette angegeben: von grün über gelb, zu orange bis rot.
- Besonderheiten gibt es bei den Bausteinen für nachgerüstete AKW. Sie sind grau, weil ein GAU zwar eine kleine Wahrscheinlichkeit aufweist, die Auswirkungen auf Biodiversität und Mensch aber kaum abschätzbar sind. Die Kosten für 1 TWh-Atomstrom ist als Spanne (\$ - \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$) angegeben: Es könnte passieren, dass ein AKW mit Millionen nachgerüstet wird und kurz darauf neue Erkenntnisse zeigen, dass die Anlage trotzdem nicht sicher weiter betrieben werden kann. Dann müsste sie gemäss Gesetz schliessen.
- Beim Importstrom gibt es zwei Varianten: Strom aus Windkraft und PV-Produktion, der sehr günstig zu kaufen ist, wenn europaweit der Wind weht oder die Sonne scheint, und fossilen Strom, den man teuer kaufen muss, wenn es auf dem ganzen Kontinent dunkel und windstill ist. Beide Bausteine sind grau, weil wir die Auswirkungen auf die Biodiversität nur in der Schweiz berücksichtigt haben.
- Wir haben Deiner Einschätzung nach eine Option, um Strom zu produzieren, vergessen? Setze die Joker-Bausteine ein.

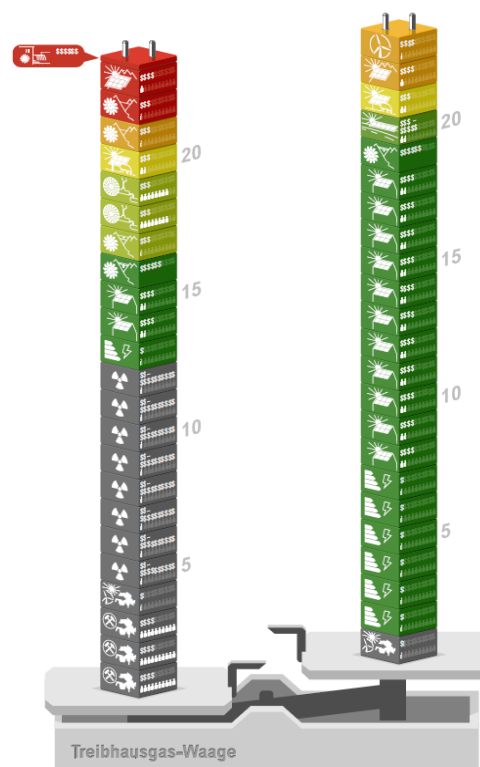
Was kann die Power-Tower Challenge?

Das Spiel demonstriert zuallererst zwei Punkte:

- **Die Energiewende bis 2035 ist möglich. Es gibt genügend realistische Optionen.**
- **Die Wahl der Optionen macht einen enormen Unterschied für die Biodiversität.**

Wer einen Power-Tower baut, kommt ins Nachdenken:

- Warum wähle ich welche Optionen?
- Was sind die Folgen?
- Was ist mir wichtig, was sekundär?
- Wie viel ist mir Autarkie wert?
- Wie könnte man vorteilhafte Optionen wie PV auf Dächern, Effizienz oder Suffizienz so fördern, dass das theoretische Potential wirklich umgesetzt werden kann?
- Wie könnte man das Potenzial einer favorisierten Option erhöhen?



Experiment!

- Lote verschiedene Szenarien aus
- Baue erst Deinen Wunschturm, danach jenen, den Du als realistisch einstufst. Was braucht es, damit Dein Wunsch zur Realität wird?

A living tower

Wir haben die Zahlen und Abschätzungen für den Power-Tower sorgfältig zusammengetragen. Aber die Zukunft ist bekanntermassen ungewiss, die Energielandschaft komplex und Fragen der Stromspeicherung und des Stromnetzes haben wir bewusst ausgeklammert. Wir nehmen Feedback deshalb gerne entgegen und bauen es gegebenenfalls in die nächste Auflage des Spiels ein: Deine Berechnungen zeigen, dass das PV-Potenzial auf Infrastruktur grösser ist als von uns angenommen? Du findest, es gibt weitere Energie-Optionen, die Bausteine im Spiel verdient haben? Schreib uns Deine Rückmeldungen an climate@wwf.ch.

Übersicht über die Bausteine für den Power-Tower

Technologie	Potenzial Winterstrom 2035	1 TWh Winterstrom verursacht		
	(Anzahl Bausteine/TWh)	Auswirkung auf Biodiversität	Treibhausgas-emissionen	Kosten
Photovoltaik auf Dächern und an Fassaden	11			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaik auf Infrastrukturen	2			\$\$\$ - \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaik in hochalpinen Lagen (High Impact)	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaik in hochalpinen Lagen (Low Impact)	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Photovoltaik auf Landwirtschaftsflächen	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Kleinwasserkraftwerke (High Impact)	0.15			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Kleinwasserkraftwerke Infrastruktur (Low Impact)	0.05			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Erhöhung bestehender Staumauern	1			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Aus-/Neubau von Grosswasserkraftanlagen (High Impact)	1			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Aus-/Neubau von Grosswasserkraftanlagen (Low Impact)	1			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Nachrüstung bestehender AKW	12			\$ - \$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Gaskraftwerke	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Windkraftwerke (High Impact)	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Windkraftwerke (Low Impact)	2			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Effizienz	7			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Suffizienz	3			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Import Wind/PV	5			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Import fossil	5			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
Power to X	2		???	???
Joker	1		???	???

Photovoltaik auf Dächern und an Fassaden

Photovoltaik (PV) auf Dächern und an Fassaden kann als einzige Technologie zur Stromproduktion rasch und in relevanten Mengen ausgebaut werden. Im Jahr 2022 betrug die Leistung der in der Schweiz installierten Photovoltaik-Anlagen rund 4.7 GW.

Der Stromertrag aus PV-Anlagen ist abhängig von Sonnenscheindauer, Höhenlage, Neigungswinkel etc. Anlagen mit grösserem Neigungswinkel (z. B. an Fassaden) haben einen höheren Winterstromanteil.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Um mit PV-Anlagen auf Dächern und an Fassaden 1 TWh Winterstrom zu erzeugen, braucht es eine installierte Leistung von rund 3.2 GW. Dies entspricht einer Dach- und Fassadenfläche von knapp 20 km² bzw. rund 66 000 Beispielanlagen Göttschihof (s.u.).

Gestehungskosten

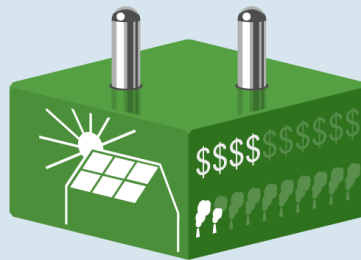
Schätzungsweise 210 Millionen CHF.

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 90 000 Tonnen CO₂eq, vor allem durch die Produktion der Module [1]. Dies entspricht ca. 0.2 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

Photovoltaikanlagen auf Dächern oder an Fassaden haben vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Biodiversität.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



90 000 t CO₂eq

Kosten



210 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



11 TWh

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



31 %

!

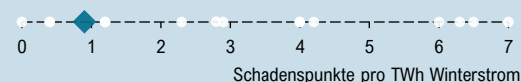
Photovoltaikanlagen an und auf Gebäuden können rechnerisch allein den ganzen Schweizer Strombedarf decken, ohne dass zusätzliche Landflächen überbaut werden müssen. Keine andere Technologie ist dazu in der Lage.



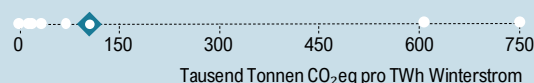
Solarprojekt Göttschihof (Kt. ZH) mit einer Solarmodulfläche von 300 m²; 56 kWp Leistung und rund 63 MWh Stromproduktion.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Photovoltaik auf Infrastrukturen

Photovoltaik (PV) auf Infrastrukturen ermöglicht es die Stromproduktion auszubauen, ohne weitere Landflächen zu überbauen. Mögliche Infrastrukturen als Träger für PV-Anlagen sind Strassen und Bahnanlagen, Parkplätze, Umspannwerke, Schutzbauten, Deponien, Kiesgruben und Steinbrüche.

Der Stromertrag aus PV-Anlagen ist abhängig von Sonnenscheindauer, Höhenlage, Neigungswinkel, etc. Anlagen mit grösserem Neigungswinkel (z. B. an Fassaden) haben einen höheren Winterstromanteil.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Um mittels PV-Anlagen auf Infrastrukturen 1 TWh Winterstrom zu erzeugen, braucht es eine installierte Leistung von rund 3.7 GW. Dies entspricht einer Infrastrukturfläche von knapp 12.6 km² bzw. rund 56 300 Anlagen wie im Beispiel unten vorgestellt (Halbüberdachung der Autobahn A2).

Gestehungskosten

Die Gestehungskosten variieren stark zwischen und innerhalb verschiedener Infrastrukturtypen. Anlagen an Böschungen sind am günstigsten, solche an Lawinverbauungen am teuersten. Die geschätzte Spanne liegt zwischen 120 und 220 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

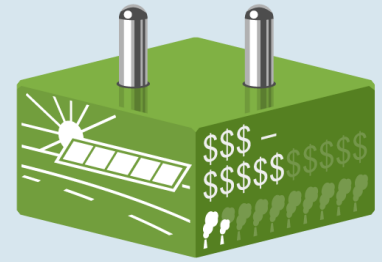
Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 90 000 Tonnen CO₂eq, vor allem durch die Produktion der Module [1]. Dies entspricht ca. 0.2 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

Photovoltaikanlagen auf Infrastrukturen haben vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Biodiversität. Spiegelnde PV-Module können Vögel irritieren. Anlagen können die Qualität von Flächen um die Infrastruktur beeinträchtigen.



Halbüberdachung der Autobahn A2 zwischen Zofingen und Strengelbach mit einer Solar-dachfläche von 3 200 m², 840 kWp Leistung und rund 700 MWh Stromproduktion pro Jahr.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen

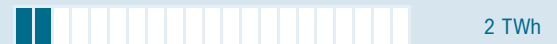


Kostenspanne

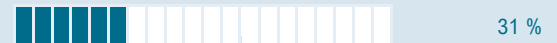


Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr

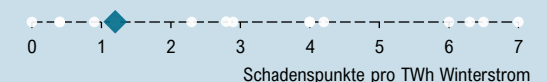


!

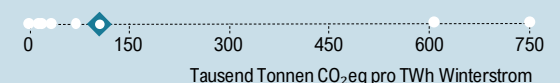
Im Winter 2022/23 hat das Bundesamt für Strassen zahlreiche Flächen auf Lärmschutzwänden entlang Autobahnen und auf Raststätten versteigert, damit dort in den nächsten Jahren Private PV-Anlagen bauen können.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Photovoltaik in hochalpinen Lagen

Photovoltaikanlagen (PV) in hochalpinen Lagen liefern besonders im Winterhalbjahr deutlich mehr Strom als ihre Pendanten im Flachland. Hochalpine Lagen profitieren von häufigeren Sonnentagen, der Reflexion des Sonnenlichts durch den Schnee, tieferen Temperaturen und der dünneren Atmosphäre.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Um mittels PV-Anlagen in hochalpinen Lagen 1 TWh Winterstrom zu erzeugen, braucht es eine installierte Leistung von rund 1,1 GW. Dies entspricht einer Fläche von rund 6,5 km² bzw. rund 61 Beispielanlagen Gundosolar (s.u.).

Gestehungskosten

Schätzungsweise 200 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 60 000 Tonnen CO₂eq, vor allem durch die Produktion der Module [1]. Dies entspricht ca. 0.15 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

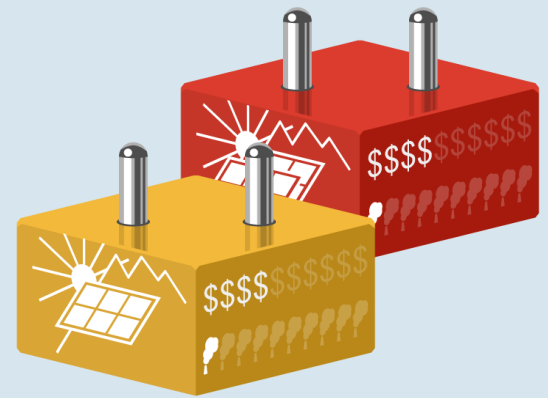
Biodiversität

Die Auswirkung auf die Biodiversität durch alpine Solaranlagen ist stark abhängig vom Standort. In so genannten High-impact-Gebieten, die besonders schützenswert sind, ist der Schaden auf die Biodiversität verglichen mit anderen Technologie-Optionen sehr gross. In Low-Impact-Gebieten sind die Auswirkungen geringer.

Die wichtigsten Auswirkungen auf die Biodiversität sind der Verlust von Lebensraum, die Fragmentierung und eine Veränderung des Mikroklimas. Zudem ist damit zu rechnen, dass zusätzlich notwendige Infrastruktur wie Zufahrtsstrassen, Transportbahnen und neue Stromleitungen die Biodiversität negativ beeinflussen.

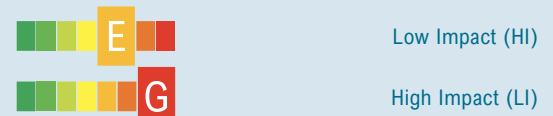


Gundosolar auf einer Fläche von 100 000 m², 18 MW Leistung und 23.3 GWh Stromproduktion pro Jahr. Die Anlage ist in Planung, es kann Anpassungen bei der Fläche, Leistung und Produktion geben. (Visualisierung)



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen

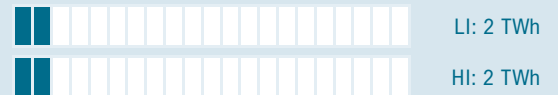


Kosten



Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr

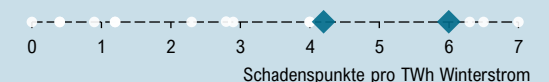


!

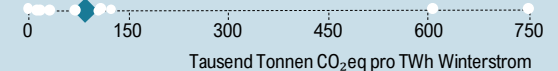
Bisher gibt es nur Pilotanlagen und somit keine langfristigen Erfahrungswerte.

Vergleich mit anderen Technologien

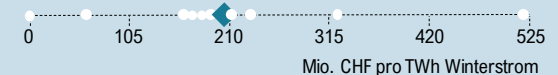
Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Photovoltaik auf Landwirtschaftsflächen

Mit Agri-Photovoltaik (Agri-PV) werden Stromproduktion und Ackerbau kombiniert. Es gibt verschiedene Varianten, wie die Module gebaut werden können: vertikal, bodennah oder als Überdachung.

Agri-PV-Anlagen sind in der Schweiz bisher nicht erlaubt, es gibt aber in diversen Kantonen Pilotprojekte. Zudem sind Bestrebungen im Parlament im Gang, um den Bau von Agri-PV-Anlagen zu ermöglichen [2].

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Um mittels Agri-PV 1 TWh Winterstrom zu erzeugen, braucht es eine installierte Leistung von rund 3.2 GW. Dies entspricht einer Fläche von knapp 20 km² bzw. rund 625 Beispielanlagen *Fruitfarm* (siehe Bild).

Gestehungskosten

Schätzungsweise 160 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

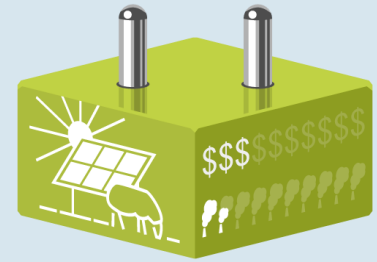
Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 90 000 Tonnen CO₂eq, vor allem durch die Produktion der Module [1]. Dies entspricht ca. 0.2 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

Photovoltaikanlagen auf Landwirtschaftsflächen haben mittlere Auswirkungen auf die Biodiversität. Negative Einflüsse können diese Anlagen auf Vögel (z. B. Irritationen durch Spiegelungen), Insekten (Verhaltensänderungen) oder Pflanzen (Abschattung – wobei manche Arten davon profitieren) haben.



Agri-PV Fruitfarm (NL) mit einer Solarüberdachung von 32 000 m² Fläche und einer installierten Leistung von 4,8 MWp.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



90 000 t CO₂eq

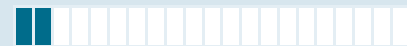
Kosten



160 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



2 TWh

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



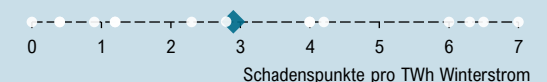
31 %

!

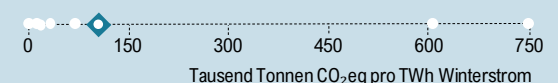
Agri-PV-Anlagen können bei gewissen Kulturen den Wasserverbrauch und den Pestizideinsatz reduzieren. Bei Gewitter und Starkregen schützen sie Kulturpflanzen. Je nach klimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen steigern oder senken die Anlagen den landwirtschaftlichen Ertrag.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Kleinwasserkraftwerke

Kleinwasserkraftwerke (weniger als 10 MW Leistung) gibt es seit über 100 Jahren. Heutige Produktion: 4 000 GWh, wovon die kleineren Anlagen (< 1 MW) rund 2 Prozent ausmachen. Kleinwasserkraftwerke weisen das geringste Ausbau-Potenzial aller betrachteten Technologien auf.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Die Einschätzungen zu den Kosten von Kleinwasserkraftwerken gehen stark auseinander, da sie sehr abhängig von Standort und Grösse sind. Des Weiteren unterscheiden sich die Kennwerte auch stark bezüglich Neubau vs. Erneuerung von Anlagen. Die folgenden Angaben sind Mittelwerte.

Gestehungskosten

Schätzungsweise 320 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 20 000 Tonnen CO₂eq. Dies entspricht ca. 0.05 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

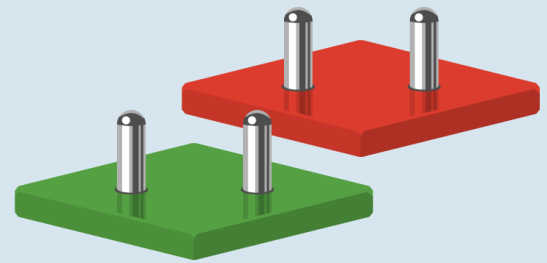
Wasserkraftwerke beeinträchtigen die Gewässerökologie, zum Beispiel durch einen aufgestauten Flusslauf oberhalb des Kraftwerks und fehlendes Wasser unterhalb, durch einen gestörten Geschiebehalt und unüberwindbare Wanderhindernisse für Fische.

Die Biodiversität leidet pro GWh produzierten Strom durch Klein- und Kleinstwasserkraft verhältnismässig stärker als durch grosse Anlagen. Die meisten grossen Fließgewässer der Schweiz sind bereits durch Wasserkraftanlagen beeinträchtigt; kleinere Gewässer bieten letzte wenig gestörte Lebensräume.

Die Kleinwasserkraft-Anlagen an natürlichen Gewässern fallen in die High-Impact-Kategorie. Sogenannte Infrastrukturanlagen, die zum Beispiel den überschüssigen Druck von Trinkwassersystemen nutzen, verursachen minimale Auswirkungen auf die Biodiversität (Low-Impact-Kategorie).



Das **Kleinwasserkraftwerk Buchholz** verfügt über eine Leistung von 0.14 MW. Die zwei eingebauten Turbinen produzieren zusammen durchschnittlich 530 MWh Strom pro Jahr.



Die Kleinwasserkraft-Bausteine sind aus Gründen der Stabilität nicht massstabsgetreu.

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Low Impact (LI)



High Impact (HI)

Treibhausgasemissionen



20 000 t CO₂eq

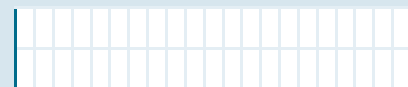
Kosten



320 Millionen CHF

Potenzial Lösung Winterstromlücke

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



LI: 0.05 TWh

HI: 0.15 TWh

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



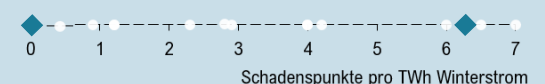
34 %

!

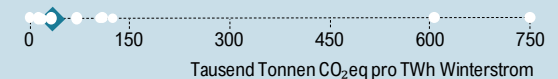
1400 Kleinwasserkraftwerke produzieren rund 10 Prozent des Schweizer Wasserkraft-Stroms. 900 davon sind Kleinstanlagen mit einer Leistung kleiner als 300 kW. Ihr Anteil an der Wasserstromproduktion beläuft sich auf lediglich 1 Prozent.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Erhöhung bestehender Staumauern

Dies umfasst ausschliesslich Projekte zur Erhöhung von bestehenden Staumauern. Die meisten dieser Projekte bewirken vor allem eine Verlagerung von bereits bestehender Produktion vom Sommer in den Winter.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Schätzungsweise 150 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 10 000 Tonnen CO₂eq. Dies entspricht ca. 0.03 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

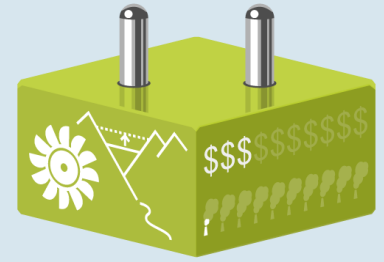
Biodiversität

Im Verhältnis mit den anderen Wasserkraftanlagen-Kategorien sind die Auswirkungen auf die Biodiversität verhältnismässig gering, da diese Projekte auf bestehende Anlageteile aufbauen (Staumauern, Stauseen, Leitungen und Turbinen). Auswirkungen können zum Beispiel die Überflutung zusätzlicher wertvoller Landflächen sein, etwa Hochmoore.



Die Erhöhung des **Staudamms Goscheneralp** könnte rund 95 GWh zusätzliche Winterstromproduktion bewirken (bei einer totalen Mehrproduktion von ca. 45 GWh pro Jahr).

(Bild: Paebi)



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



10 000 t CO₂eq

Kosten



150 Millionen CHF

Potenzial Lösung Winterstromlücke

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



1 TWh

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



100 %

!

Aufgrund der Topologie vieler alpinen Speicherseen (steile Ufer) ist der zusätzliche Biodiversitätsimpact verhältnismässig klein – vorausgesetzt, geltendes Recht wird eingehalten und keine neuen Einzugsgebiete oder wertvollen Ökosysteme werden beeinträchtigt.

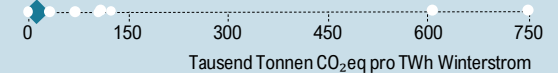
Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



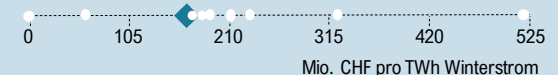
Schadenspunkte pro TWh Winterstrom

Treibhausgasemissionen



Tausend Tonnen CO₂eq pro TWh Winterstrom

Kosten



Mio. CHF pro TWh Winterstrom

Aus- oder Neubau von Grosswasserkraftanlagen

Diese Option umfasst die Erweiterung bestehender Wasserkraftnutzungen, z. B. durch Erschliessung von Gewässern, die nahe an den bereits genutzten Gewässern liegen, oder durch den Einbau einer weiteren Nutzungsstufe (z. B. Schwall-Ausleit-Kraftwerke) und Neubauprojekte (z. B. neue Laufwasserkraftwerke oder Speicheranlagen an ungenutzten Gewässern).

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Schätzungsweise 170 Millionen Franken (Low Impact) und 190 Millionen Franken (High Impact).

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 15 000 Tonnen CO₂eq. Dies entspricht ca. 0.04 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

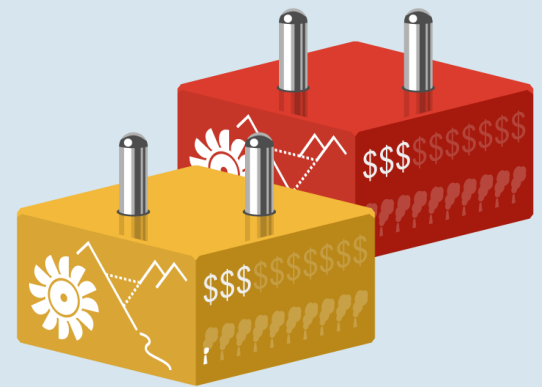
Wasserkraftwerke beeinträchtigen die Gewässerökologie, zum Beispiel durch einen aufgestauten Flusslauf oberhalb des Kraftwerks und fehlendes Wasser unterhalb, durch einen gestörten Geschiebehaushalt und unüberwindbare Wanderhindernisse für Fische.

Die Auswirkungen auf die Biodiversität sind stark abhängig vom individuellen Projekt und seinem Standort. Die Erweiterung bestehender Anlagen hat tendenziell weniger Auswirkungen (Low-Impact-Kategorie) als neue Projekte (High-Impact-Kategorie). Erweiterungsprojekte fallen in die High-Impact-Kategorie, wenn sie Gewässer mit Schutzstatus betreffen (z.B. Auen, Amphibienlaichgebiete, Moore oder UNESCO-Gebiete).



Linthal 2015 Mit der Erneuerung und dem Ausbau der Anlagen der Kraftwerke Linth-Limmern stieg das Speichervolumen von 9 Millionen Kubikmeter Wasser auf 23 Millionen Kubikmeter.

(Bild: Peter Schenk)



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Low Impact (LI)

High Impact (HI)

Treibhausgasemissionen



15 000 t CO₂eq

Kosten



170 Millionen CHF

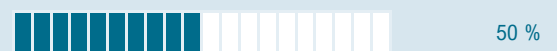
Potenzial Lösung Winterstromlücke

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Für Bausteine gerundet auf je 1 TWh.

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr

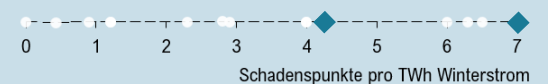


!

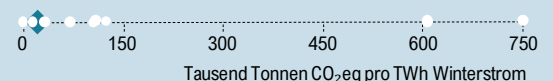
High-Impact-Projekte sind schwierig zu realisieren, da mit langwierigen Abklärungen und Verfahren zu rechnen ist.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Atomkraft: Nachrüstung bestehender Anlagen

In der Schweiz sind vier Kernkraftwerke (AKW) mit einer Leistung von insgesamt 2973 MW in Betrieb [3]. Ein fünftes in Mühleberg wurde 2019 abgeschaltet und befindet sich im Rückbau [4]. Die AKW produzieren jährlich rund 18.5 TWh Bandenergie [5].

Bestehende AKW dürfen in der Schweiz so lange weiterbetrieben werden, wie sie sicher sind. Der Bau neuer Kraftwerke ist hingegen untersagt [6].

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Die untere Grenze der Gestehungskosten für eine TWh Winterstrom liegen für die Nachrüstung von AKW bei geschätzt 40 Millionen Franken. Wenn sich neue Erkenntnisse ergeben, die den sicheren Betrieb eines AKW in Frage stellen, muss die Aufsichtsbehörde des Bundes (ENSI), eine Nachrüstung verlangen oder die Betriebsbewilligung entziehen. Dies kann unter Umständen auch kurz nach einer vorherigen Nachrüstung passieren und würde wahrscheinlich die Gestehungskosten stark nach oben treiben, auf bis zu 520 Millionen Franken.

Treibhausgasemissionen

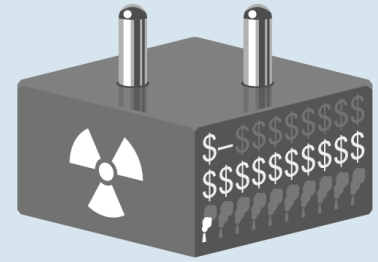
Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 20 000 Tonnen CO₂eq. Dies entspricht ca. 0.05 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

Da die AKW bereits in Betrieb sind, ist der Schaden beim Weiterbetrieb für die Biodiversität an sich verhältnismässig gering. Relevant sind das Kühlwasser, welches aufgrund der heisser werdenden Sommer knapp werden könnte und die ungelöste Abfallproblematik. Allerdings sind die möglichen Auswirkungen nach einem schweren Unfall (GAU) kaum abzuschätzen. Darum wird auf eine Einschätzung für diesen Fall verzichtet und die AKW-Bausteine sind grau gefärbt.

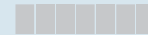


Das AKW Gösgen ging 1979 ans Netz und hat eine Leistung von 1010 MW.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kostenspanne



Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



!

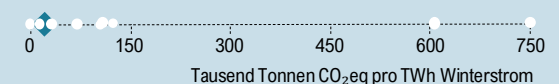
Die ursprünglich vorgesehene Betriebsdauer der AKW beträgt 50 Jahre, entsprechend würde 2034 mit Leibstadt das letzte ausser Betrieb genommen.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität

Nicht bewertet

Treibhausgasemissionen



Kosten



Gaskraftwerke

Gaskraftwerke ermöglichen eine flexible Stromproduktion, da sie nach Bedarf rasch hoch- und heruntergefahren werden können. Sie sind daher geeignet, Nachfragespitzen zu decken. Entsprechend hat der Bundesrat bereits fossile Kraftwerke (Gas resp. Öl) für ausserordentliche Mangellagen errichtet, weitere sollen folgen.

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Schätzungsweise 180 Millionen Franken.

Da die Gaspreise jedoch seit spätestens dem Ukrainekrieg stark schwanken, sind Aussagen zu den Gestehungskosten schwierig. Bei Gaspreisen wie am 7. März 2022 (höchster Gaspreis am Spotmarkt im Winterhalbjahr) hätten die Gestehungskosten 325 Millionen Franken und somit fast das doppelte pro TWh Winterstrom betragen.

Treibhausgasemissionen

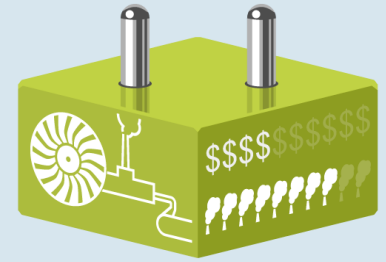
Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 610 000 Tonnen CO₂eq, vor allem durch das Verbrennen von Erdgas. Dies entspricht etwa 1.4 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

Biodiversität

Negative Auswirkungen auf die Biodiversität haben Gaskraftwerke vor allem wegen des hohen Treibhausgasausstosses und des verursachten Lärms.



Gas- und Dampfkraftwerk Irsching (D) (Block 4) mit einer Leistung von 561 MW und einem Wirkungsgrad von 60,4 Prozent.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr

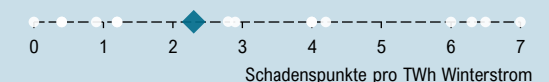


!

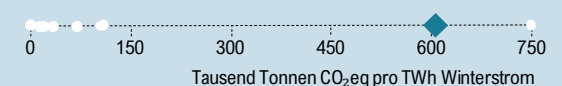
Die Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom empfiehlt den Bau von zwei bis drei Gaskraftwerken mit einer kumulierten Leistung von 0.7-1.4 GW um mögliche Versorgungslücken zu schliessen [7]. Gemäss einer Studie der ZHAW sind dafür aber keine Gaskraftwerke notwendig [8].

Vergleich mit anderen Technologien

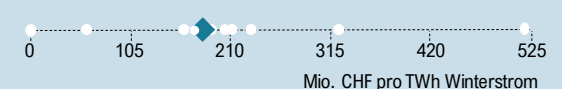
Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Windkraftwerke

Windkraftanlagen produzieren rund zwei Drittel der Jahresstromproduktion im Winterhalbjahr [9]. 2021 betrug die Leistung der in der Schweiz installierten Windkraftanlagen rund 87 MW, mit einer Jahresproduktion von 146 GWh. Aktuell befinden sich Projekte mit einer geplanten Leistung von rund 897 MW in Planungs- und Bewilligungsverfahren [10].

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Schätzungsweise 220 Mio. CHF.

Treibhausgasemissionen

Die Produktion einer TWh Winterstrom verursacht über die gesamte Produktionskette geschätzt 20 000 Tonnen CO₂eq. Dies entspricht rund 0.05 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen.

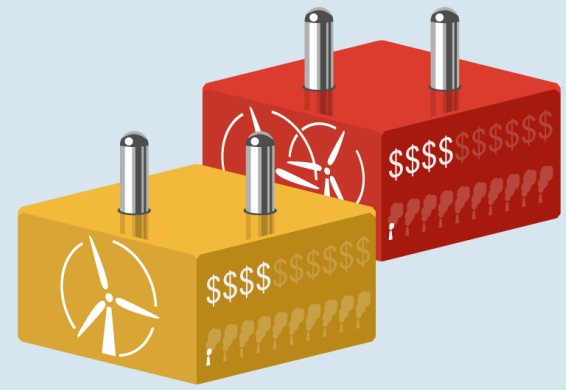
Biodiversität

Die Auswirkung auf die Biodiversität durch Windkraftwerke ist stark abhängig vom Standort. In so genannten High-Impact-Gebieten, die besonders schützenswert sind, sind die Auswirkungen verglichen mit den anderen Technologieoptionen gross. In Low-Impact-Gebieten sind sie geringer.

Die Hauptauswirkungen auf die Biodiversität sind der Verlust von Lebensraum sowie Kollisionsgefahr für Vögel und Fledermäuse mit den Rotoren. Zusätzlich notwendige Infrastruktur wie Zufahrtsstrassen und neue Stromleitungen können die Biodiversität ebenfalls negativ beeinflussen.



Im Windpark Mont-Crosin (BE) stehen 16 unterschiedliche Windräder mit einer Gesamtleistung von 37.2 MW. Damit ist dies der Windpark mit der grössten Leistung in der Schweiz.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Low Impact (LI)

High Impact (HI)

Treibhausgasemissionen



20 000 t CO₂eq

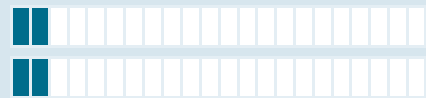
Kosten



220 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



67 %

!

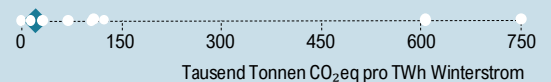
Windkraftwerke können einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Winter leisten, weil sie die Mehrheit ihrer Produktion in der kalten Jahreszeit liefern.

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Massnahmen für Energie-Effizienz

Massnahmen im Bereich Stromeffizienz gelten als kostengünstig und langfristig wirtschaftlich. Sie sind oft einfacher zu realisieren als Netz- und Produktionsausbauten, d.h. sie können rasch umgesetzt werden. Das Einsparpotenzial durch Effizienzmassnahmen liegt theoretisch bei bis zu 40 Prozent der Elektrizitätsnachfrage. Massnahmen in den Bereichen Heizen und Beleuchtung wirken in den Wintermonaten stärker als im Sommer [11].

Kennwerte für die Einsparung von 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Schätzungsweise 40 Mio. CHF.

Treibhausgasemissionen

Effizienzmassnahmen führen meist nicht zu grossen Treibhausgasemissionen. Durch die Energieeinsparungen können Emissionen in vielen Fällen sogar reduziert werden.

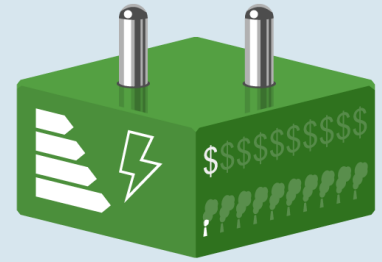
Biodiversität

Effizienzmassnahmen haben meist kaum Auswirkungen auf die Biodiversität. Wird das Geld, das durch erhöhte Effizienz eingespart wird, für andere Investitionen ausgegeben (Rebound-Effekt), kann dies indirekt zu Schäden an der Umwelt führen.



Bei der Beleuchtung können durch Umstellung auf LED, den Einsatz von Sensorik (Bewegungsmelder) und intelligenter Steuerung sowie bedarfsgerechter Planung zwischen 50 und 70 Prozent eingespart werden [11].

(Bild: evenina tao/Freepik)



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen

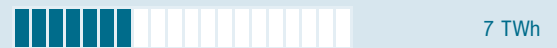


Kosten

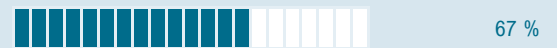


Potenzial Winterstrom

Mögliche Einsparung Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Sparpotenzial Winterhalbjahr

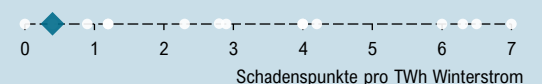


!

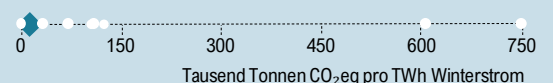
Obwohl Effizienzmassnahmen zu den günstigsten Aktivitäten gehören, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen, behindern fehlende Sensibilisierung, Informationsdefizite, unterschiedliche Interessen von Marktakteur:innen bis hin zu rechtlichen Rahmenbedingungen die Umsetzung [11].

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Suffizienz

Weniger ist mehr – das ist die Kürzesterklärung für den Begriff Suffizienz. Um Strom im Winter zu sparen, kann man zum Beispiel die Raumtemperatur um ein oder zwei Grad senken. Eine Untersuchung des Energieverbrauchs von 10 000 Schweizer Haushalten zeigte, dass es ein beträchtliches Potenzial für Suffizienz im Strombereich gibt [12].

Kennwerte für die Einsparung von 1 TWh Winterstrom

Gestehungskosten

Die meisten Suffizienz-Massnahmen bestehen im Verzicht auf eine Leistung oder Handlung. Dies mag manchmal Opportunitätskosten nach sich ziehen, unter dem Strich sind die reinen Kosten wohl nahe null.

Treibhausgasemissionen

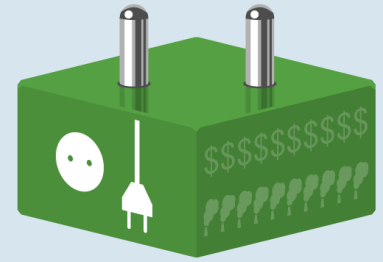
Analog zu den Überlegungen bei den Kosten sind die THG-Emissionen in der Bilanz wohl null.

Biodiversität

Suffizienzmassnahmen haben oft sogar positive Auswirkungen auf die Biodiversität. Wird das Geld, das durch erhöhte Effizienz eingespart wird, für andere Investitionen ausgegeben (Rebound-Effekt), kann dies indirekt zu Schäden an der Umwelt führen. In der Bilanz: beste Kategorie.



Suffizienz erfordert die Initiative von Einzelpersonen, Familien, Gruppen und Unternehmen und der Politik, die die Rahmenbedingungen so ausgestalten kann, dass Suffizienz-Massnahmen ermöglicht werden.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Potenzial Winterstrom

Mögliche Einsparung Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Sparpotenzial Winterhalbjahr



!

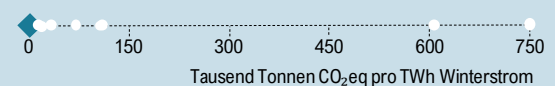
Wissenschaftliche Arbeiten und die Erfahrung zeigen, dass es schwierig ist, Suffizienz-Massnahmen in der Gesellschaft breit umzusetzen [13].

Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität



Treibhausgasemissionen



Kosten



Import von Strom

Die Schweiz ist eine Drehscheibe des europäischen Stromnetzes. In den letzten zwölf Jahren wurde in fünf Jahren unter dem Strich Strom importiert und in sieben exportiert. 2021 betrug die Exportmenge 29.1 TWh, importiert wurden 31.5 TWh (in der Bilanz resultierte ein Netto-Import von rund 2.4 TWh [14]).

Die Schweiz ist im Winterhalbjahr abhängig von Importen, im Sommerhalbjahr exportiert sie in der Regel Strom. In den Wintermonaten Oktober bis März 2020/21 wurden netto 1.8 TWh importiert [15].

Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Ums Jahr 2035 werden die Produktionskapazitäten für erneuerbaren Strom im benachbarten Ausland deutlich höher liegen als heute. Das wird dazu führen, dass auch im Winter zu manchen Zeiten viel günstiger Überschussstrom aus erneuerbarer Produktion importiert werden kann, zum Beispiel Windstrom aus Nordeuropa. Wenn im Winter so genannte Dunkelflauten herrschen – bei Windstille und wenig Sonne – muss Strom aus nicht erneuerbarer Produktion importiert werden. Dieser verursacht hohe CO₂-Emissionen.

Gestehungskosten

Schätzungsweise 50 Mio. CHF für den Import von erneuerbarem Überschussstrom aus Sonne und Wind (ESI) und 200 Mio. CHF für fossil generierten Strom (FSI).

Treibhausgasemissionen

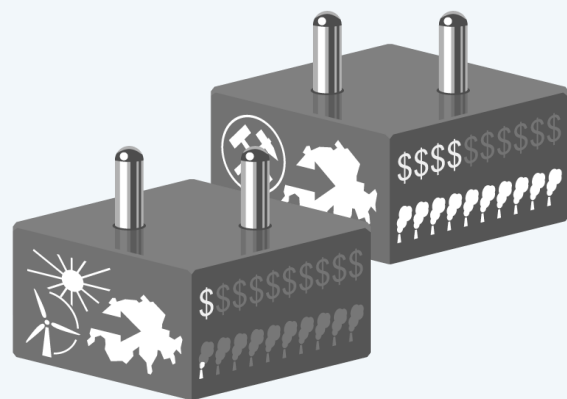
Rund 20 000 t CO₂eq für einen Importmix aus Wind- und Solarstrom und 750 000 t CO₂eq für einen Importmix aus Kohle- und Gasstrom.

Biodiversität

Der Grossteil der Auswirkungen der Biodiversität fällt im Ausland an und wird daher gemäss Methodik nicht berücksichtigt.



Für den Import sind genügend hohe Kapazitäten im grenzüberschreitenden Stromnetz und ein funktionierendes Stromabkommen mit der EU massgebend



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Nicht bewertet

Treibhausgasemissionen



ESI: 20 000 t CO₂eq

FSI: 750 000 t CO₂eq

Kosten

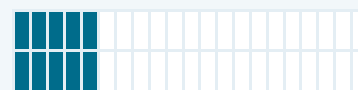


50 Millionen CHF

200 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom im Jahr 2035



ESI: 5 TWh

FSI: 5 TWh

Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr



100 %

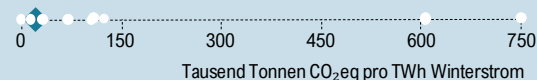
Vergleich mit anderen Technologien

Biodiversität

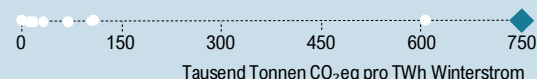
nicht bewertet

Treibhausgasemissionen

ESI

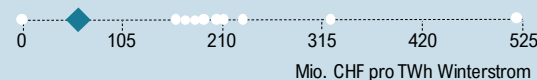


FSI

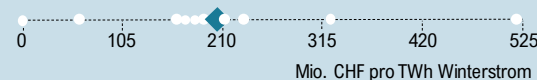


Kosten

ESI



FSI

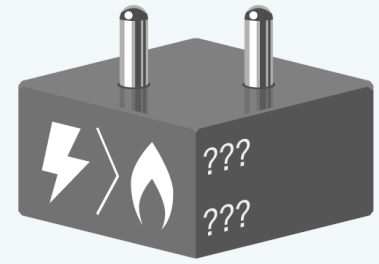


Power to X

Viele Fachleute und Akteure im Energiesektor gehen davon aus, dass die so genannte Power-to-X-Technologie künftig eine Rolle spielen wird, um überschüssigen erneuerbaren Strom aus dem Sommer in den Winter zu transferieren. Zum Beispiel kann aus Strom, der aus PV stammt oder aus Laufkraftwerken an Flüssen, zu Überschusszeiten mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff hergestellt werden. Dieser wird gespeichert und im Winter wird daraus in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen wieder Strom erzeugt.

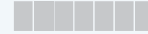
Kennwerte für 1 TWh Winterstrom

Aktuell ist es kaum möglich, aussagekräftige Abschätzungen zum Potenzial, Gestehungskosten, Treibhausgasemissionen und Auswirkungen auf die Biodiversität zu machen.



1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkung auf die Biodiversität



Treibhausgasemissionen

???

Kosten

???

Potenzial Winterstrom

Hypothetisches Potenzial Winterstrom im Jahr 2035



Anteil Sparpotenzial Winterhalbjahr



!

Es wird eine Reihe von möglichen Verwendungszwecken von «überschüssigem» erneuerbarem Strom geben: Zum Beispiel für die Produktion von Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen, die in der Luft- oder Schifffahrt oder in der Industrie eingesetzt werden können.



Power to X ist eine Art Batterie für überschüssigen Strom.

(Bild: Freepik)

Literatur

- [1] BAFU, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018», 2021. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf.download.pdf/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf> (abgerufen 11. Dezember 2022)
- [2] Jäger, M.; Vaccaro, C.; Boos, J.; Junghardt, J.; Strelbel, S.; Anderegg, D.; Rohrer, J. und Schibli, B. (2022): «Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft». ZHAW.
- [3] IAEA, «Country Statistics Switzerland», Country Statistics Switzerland, 10. Dezember 2022. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CH> (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [4] BKW (2022): «Die Stilllegung des Kernkraftwerks Mühleberg», Die Stilllegung des Kernkraftwerks Mühleberg. Verfügbar unter: <https://www.bkw.ch/de/energie/energieproduktion/stilllegung-kernkraftwerk-muehleberg> (abgerufen: 11. Dezember 2022).
- [5] BFE, «Gesamte Erzeugung und Abgabe elektrischer Energie in der Schweiz 2021», 2022. Verfügbar unter: https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html#tab__content_bfe_de_home_versorgung_statistik-und-geodaten_energiestatistiken_elektrizitaetsstatistik_jcr_content_par_tabs (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [6] UVEK, «Ausstieg aus der Kernenergie», 2017. <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz/kernenergie.html> (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [7] ElCom, «Winterproduktionsfähigkeit – Einschätzungen der ElCom zur Stromversorgungssicherheit Schweiz bis 2035», 2023.
- [8] Rohrer, J.; Wild, M.; Stocker, N. und Siegwart, M. (2023): «Gibt es bessere Alternativen zu fossilen Kraftwerken für die Versorgungssicherheit der Schweiz mit Strom?». ZHAW.
- [9] Suisse Éole, «Windenergiestrategie: Winterstrom & Klimaschutz Analyse und Aktualisierung des Potenzials der Windenergie in der Schweiz», Suisse Éole, 2020. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAxMDk=.html> (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [10] Suisse Éole, «Windenergie in der Schweiz in Zahlen», suisseéole, 2022. Verfügbar unter: https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2022/10/SE_02_20_FACTSHEET_D_V3-1.pdf (abgerufen 9. Dezember 2022).
- [11] BFE, «Potenzial und Massnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz bis 2025», 2022. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/70290.pdf> (abgerufen 11. Dezember 2022).
- [12] Swiss Household Energy Demand Survey (SHEDS), <https://www.sccer-crest.ch/research/swiss-household-energy-demand-survey-sheds/> (abgerufen 25. Juli 2023).
- [13] Moser, C; Rösch, A. und Stauffacher, M (2015): «Exploring societal preferences for energy sufficiency in Switzerland», *Frontiers in Energy Research*, 3:1-12.
- [14] BFS, «Ausfuhr und Einfuhr elektrischer Energie - 1950-2021 | Tabelle», Bundesamt für Statistik, 2022. <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/23104769> (abgerufen 15. Dezember 2022).
- [15] BFE, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021», 2022. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA5NDI=.html> (abgerufen 15. Dezember 2022).

Inhaltsverzeichnis Methodik

1	Methodik	23
1.1	Allgemein	23
1.1.1	Datengrundlage	23
1.1.2	Referenzzeitraum	23
1.2	Zusätzlicher Bedarf Winterstrom 2035/35	23
1.3	Auswahl der Technologien	25
1.4	Kriterien für den Vergleich	26
1.5	Vereinheitlichung der Bewertung auf die Einheit TWh Winterstrom	28
1.6	Energieerzeugungs-Optionen	29
1.6.1	Photovoltaik auf Dächern und an Fassaden	29
1.6.2	Photovoltaik auf Infrastrukturen	30
1.6.3	Photovoltaik in hochalpinen Lagen	31
1.6.4	Photovoltaik auf Landwirtschaftsflächen	32
1.6.5	Kleinwasserkraftwerke	33
1.6.6	Erhöhung bestehender Staumauern	35
1.6.7	Aus- oder Neubau von Grosswasserkraftwerken	36
1.6.8	Nachrüstung Atomkraftwerke	37
1.6.9	Gaskraftwerke	38
1.6.10	Windkraftwerke	39
1.6.11	Effizienz	41
1.6.12	Suffizienz	42
1.6.13	Stromimporte	43
1.6.14	Power to X	44
1.6.15	Joker	45
2	Glossar	46
	Literaturverzeichnis	47

1 Methodik

Im Rahmen des Spiels «Power-Tower Challenge» werden Technologien zur Stromerzeugung verglichen, die einen Beitrag zur Deckung des zusätzlichen Bedarfs an Strom im Winter 2035/36 leisten könnten. Wir vergleichen dazu pro Terawattstunde (TWh) Winterstrom die drei Kriterien

1. Gestehungskosten
2. Treibhausgasemissionen
3. Auswirkungen auf die Biodiversität

und schätzen ab, wie viele TWh eine Produktionstechnologie potenziell bis im Winter 2035/36 liefern kann. Dazu stützen wir uns auf die im Jahr 2023 vorhandenen Technologien und Kennwerte.

1.1 Allgemein

1.1.1 Datengrundlage

Unsere zentrale Datengrundlage zur Abschätzung des Winterstrombedarfs 2035/2036 sind die Energieperspektiven 2050+ des Bundes und das Netto-Null-Szenario der Umweltallianz. Diese haben wir mit aktuelleren Abschätzungen zu den Potenzialen ergänzt. Alle Quellen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

1.1.2 Referenzzeitraum

Als Grundlage für unsere Überlegungen dienten die Jahre 2020-2023 bzw. die Winterhalbjahre 2020/21 bis 2022/23. Zieljahr ist 2035 bzw. das Winterhalbjahr 2035/36.

1.2 Zusätzlicher Bedarf Winterstrom 2035/36

Definition Die Strommenge, die im Winterhalbjahr 2035/36 importiert werden müsste, wenn ab dem Zeitraum 2020-2023 kein Ausbau der Stromproduktion in der Schweiz mehr stattfinden würde und die AKW nach ihrer Laufzeit von 50 Jahren abgeschaltet werden.

Als Winterhalbjahr bezeichnen wir die Monate Oktober bis und mit März des Folgejahres (identisch zur Elektrizitätsstatistik des BFE).

Abschätzung Den zusätzlichen Strombedarf für das Winterhalbjahr 2035/36 haben wir unter folgenden Annahmen basierend auf den Stromimporten in den drei Winterhalbjahren 2020-23 extrapoliert:

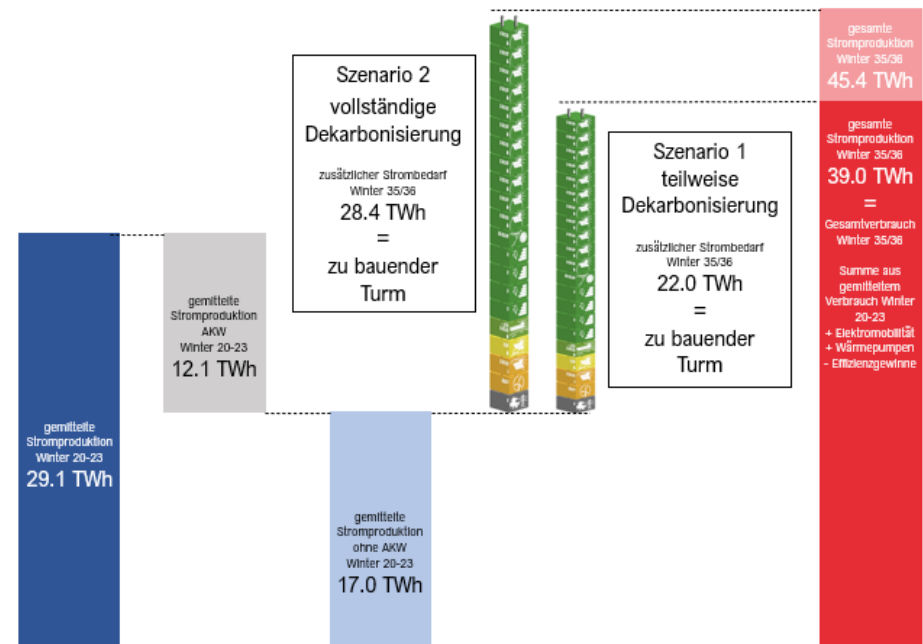
- Alle Atomkraftwerke werden ausser Betrieb genommen (Laufzeit: 50 Jahre)
- Der teilweise resp. vollständige Ausstieg aus den fossilen Energien erhöht die Elektrizitätsnachfrage. Dazu haben wir zwei Szenarien ausgewählt:
 - Szenario 1 gemäss Zielpfad des Klimaschutzgesetzes resp. Langfristklimaplan des Bundesrates zuzüglich einer Korrektur für einen gegenüber den Energieperspektiven 2050+ schnelleren Ausbau der Elektromobilität (gemäss [3])¹.
 - Szenario 2 entspricht einer vollständigen Dekarbonisierung bis 2035 gemäss Vorschlag der Umweltallianz [29].

Daraus ergibt sich folgende Kalkulation – Szenario 1:

gemittelte Gesamtstromproduktion Winterhalbjahre 2020-23	29.1 TWh
- gemittelte Winterproduktion AKW 2020-23	12.1 TWh
= gemittelte Winterproduktion ohne AKW 2020-23	17.0 TWh
gemittelter Gesamtverbrauch Winterhalbjahre 2020-23	35.6 TWh
+ erhöhte Nachfrage durch Elektrif. Wärmeerzeugung / E-Mobilität	} 3.4 TWh
+/- Effizienzgewinne und andere Nachfrage-Änderungen bis 2035/36	
= Gesamtstrombedarf Winterhalbjahr 2035/36	39.0 TWh
> ges. zusätzlicher Strombedarf Winter 2035/36 $\hat{=}$ Höhe Power-Tower	22.0 TWh

Szenario 2:

= gemittelte Winterproduktion ohne AKW 2020-23 (wie Szenario 1)	17.0 TWh
gemittelter Gesamtverbrauch Winterhalbjahre 2020-23	35.6 TWh
+ erhöhte Nachfrage durch Elektrif. Wärmeerzeugung / E-Mobilität	} 9.8 TWh
+/- Effizienzgewinne und andere Nachfrage-Änderungen bis 2035/36	
= Gesamtstrombedarf Winterhalbjahr 2035/36	45.4 TWh
> ges. zusätzlicher Strombedarf Winter 2035/36 $\hat{=}$ Höhe Power-Tower	28.4 TWh



¹ Dies würde bedingen, dass das im Jahr 2023 in Revision befindliche CO₂-Gesetz gegenüber der Version des Bundesrates deutlich verschärft wird, denn die Massnahmen im Klimagesetz bringen die Schweiz nicht auf den CO₂-Absenkpfad, der dort im Sinne eines Rahmengesetzes festgelegt und vom Volk bestätigt wurde.

Strom-Import Winter 2020-2023	Gemittelte Differenz zwischen Verbrauchs- und Produktionswerten im Winterhalbjahr gemäss BFE [1] 6.5 TWh.
Durchschnittl. Winterstromproduktion Atomkraft 2020-23	Gemäss BFE [1] 12.1 TWh.
Relative Veränderung Elektrizitätsverbrauch	Die relative Veränderung des Elektrizitätsverbrauchs im Winter 2035/36 gegenüber den Jahren 2020-23 basiert auf den Energieperspektiven 2050+ [2] und zwei Szenarien mit rascherer Elektrifizierung des Verkehrs [3], resp. rascherer Elektrifizierung des Verkehrs und der Wärmeversorgung als in den EP2050+ [4]. Zur Berechnung des Stromverbrauchs im Winterhalbjahr nehmen wir ein über das Jahr gleichbleibendes Verbrauchsverhalten der verschiedenen Verwendungszwecke für Elektrizität an. Ausnahme ist der Verbrauch für Raumwärme; diesen schreiben wir zu 100 Prozent dem Winterhalbjahr zu. Mit dieser Gewichtung der relativen Veränderung ergibt sich ein Anstieg des Stromverbrauchs im Winterhalbjahr 2035/36 verglichen mit 2020-23 um 3.4 TWh (Szenario 1) resp. 9.8 TWh (Szenario 2).

1.3 Auswahl der Technologien

Auswahl der Technologien Diese Studie konzentriert sich auf Technologien, die folgende Kriterien erfüllen:

- 1 Potenziell kann die Technologie im Jahr 2035 einen relevanten Beitrag an den Winterstrom liefern (technisches Potenzial): Mindestens 1 TWh Strom im Winterhalbjahr 2035/36. Für Kleinstwasserkraftwerke wurde eine Ausnahme gemacht, da das zusätzliche Potential zwar sehr klein, aber die Technologie gut bekannt ist.
- 2 Die gesetzlichen Grundlagen sind aktuell so, dass die Technologie eingesetzt werden kann oder die notwendigen Gesetzesänderungen werden zumindest im Parlament diskutiert.
- 3 Die technologische Machbarkeit ist heute gegeben.

Wo die gleiche Stromproduktionstechnologie in verschiedenen Anwendungsarten vorkommen kann, dabei aber von unterschiedlichen Kosten und Auswirkungen ausgegangen wird, werden pro Konfiguration eigene Bausteine und Faktenblätter erstellt.

Unter anderem erfüllen folgende Technologien die Vorgaben nicht und werden deshalb nicht ins Sortiment für den Bau des Power-Towers aufgenommen:

Geothermie Gemäss den Energieperspektiven 2050+ gibt es in der Schweiz grosse Potenziale für Tiefengeothermie-Projekte. Jedoch: «Da die Erkundung geeigneter Standorte zeitaufwändig und nicht immer erfolgreich ist, wird angenommen, dass bis 2035 nur die derzeit geplanten Projekte realisiert werden. Erst danach folgen weitere Anlagen, so dass die Stromerzeugung aus Geothermie 2050 bei 2 TWh liegt» [2, S. 25].

Im technischen Bericht zu den Energieperspektiven 2050+ wird die Stromproduktion aus Geothermie entsprechend für das Jahr 2035 im Szenario *Zero Basis* mit 0.07 TWh angegeben [5, S. 322]. Nur rund die Hälfte davon stünde für den zusätzlichen Winterstrombedarf zur Verfügung. Aufgrund ihres geringen Potenzials bis im Jahr 2035 wird die Geothermie nicht berücksichtigt.

Neue AKW Die bestehenden Schweizer AKW dürfen weiterbetrieben werden, solange sie sicher sind. Die Kriterien für den sicheren Betrieb definiert das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Jedoch

werden keine Rahmenbewilligungen für die Erstellung neuer Kernkraftwerke sowie für grundlegende Änderungen an bestehenden Kernkraftwerken erteilt. [6]

Für neue AKW bräuchte es gesetzliche Anpassungen, anschliessend müssten konkrete Projekte ausgearbeitet, bewilligt und gebaut werden. Daher ist es nahezu ausgeschlossen, dass bis 2035 in der Schweiz neue AKW in Betrieb gehen könnten. Deshalb werden neue AKW nicht berücksichtigt.

Restwasser Mehrfach wurde vorgeschlagen, die Umweltauflagen bei Wasserkraftwerken zu senken, insbesondere die Restwassermengen. Analysen [38] zeigen aber: die Mehrproduktion, die dadurch zu erreichen ist, ist äusserst gering – gerade in den Wintermonaten: Durch Sistung der Restwassermengen liessen sich bis 2035 pro Jahr nur 90 GWh Mehrproduktion erreichen; bei gleichzeitig sehr starken ökologischen Auswirkungen.

Sanierung Wasserkraft Ein Grossteil der bereits bestehenden Anlagen genügen den heutigen Auflagen des Gewässerschutzes für neue Anlagen nicht, z.B. in Bezug auf Restwasser, künstlicher Hochwasser oder Fischdurchgängigkeit. Darum sollten diese künftig ökologisch saniert werden. Die Leistung der Kraftwerke kann dadurch jedoch kaum erhöht werden. Ein Grund dafür ist, dass sich bei der Wasserkraft die Produktionskosten kaum mehr durch technische Entwicklung oder Skaleneffekte senken lassen. Aus diesem Grund kann es schon ökonomisch herausfordernd sein, eine Anlage zu betreiben oder zu erneuern.

Biomasse Gemäss den Energieperspektiven 2050+ ist das Potenzial für den Einsatz von Biomasse in der Stromerzeugung begrenzt, weil sie bevorzugt in Sektoren mit wenigen Alternativen zur Dekarbonisierung eingesetzt werden soll (z.B. im Industrie-Sektor zur Erzeugung von Prozesswärme).

1.4 Kriterien für den Vergleich

Kosten Wir vergleichen die geschätzten Stromgestehungskosten, bezogen auf das Jahr 2021. Sowohl Teuerung als auch Preissenkungen aufgrund von Lernkurven werden ignoriert – eine konservative Annahme, da Technologien i. A. mit zunehmender Erfahrung und vermehrtem Einsatz günstiger werden. Auch nehmen wir an, dass die Gestehungskosten von der ersten bis zur letzten – und somit das Potenzial ausschöpfende – TWh konstant sind.

Die Einteilung in die Kostenkategorie erfolgt folgendermassen:

Spanne in Millionen CHF	Symbol
0 – 57	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
58 – 114	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
115 - 172	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
173 – 229	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
230 – 287	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
288 – 344	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
345 – 402	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$

403 – 459	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
460 – 517	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
> 517	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$

Treibhausgas-emissionen Mit dem vom Bundesrat gesetzten Ziel von Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050 und den vorgesehenen Absenkpfeilen sind die Treibhausgasemissionen ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Wahl der Stromproduktionstechnologie. Da die Klimaerwärmung in der Schweiz von allen weltweiten Treibhausgasemissionen beeinflusst wird, berücksichtigen wir die Treibhausgasemissionen der gesamten Produktionskette und nicht nur die im Inland anfallenden.

Die Einteilung in die Kostenkategorie erfolgt folgendermassen:

Spanne in t CO ₂ eq	Symbol
0 – 78	
79 – 157	
158 – 236	
237 – 315	
316 – 394	
395 – 473	
474 – 552	
553 – 631	
632 – 710	
> 711	

Biodiversität Erneuerbare Stromproduktionstechnologien bringen erhebliche Verbesserungen für den Klimaschutz. Allerdings können sich in anderen Bereichen des Natur- und Umweltschutzes neue Konfliktfelder ergeben, unter anderem für die Biodiversität. Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Biodiversität haben Expert:innen aus Forschung und NGO im Rahmen eines Workshops die folgenden Biodiversitätsindikatoren für die verschiedenen Stromproduktionstechnologien auf einer Skala von null (keine Auswirkung) bis neun (sehr starke Auswirkung) bewertet und zueinander gewichtet.

Indikator	Gewichtung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	2
Qualität der Fläche	3
Landschaftszerschneidung	2
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	2
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	1.5
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	2

Die Optionen wurden gemäss dem resultierenden Gesamtwert in eine von sieben Kategorien eingeteilt – analog zur bekannten Energie-Effizienzetikette. Die Einteilung erfolgte wie in folgender Tabelle dargestellt:

Punktzahl	Kategorie
0.0 – 12.0	A
12.1 – 24.0	B
24.1 – 36.0	C
36.1 – 48.0	D
48.1 – 60.0	E
60.1 – 72.0	F
> 72.1	G

1.5 Vereinheitlichung der Bewertung auf die Einheit TWh Winterstrom

Wir vergleichen dazu pro Terawattstunde (TWh) **Winterstrom** die drei Kriterien

- 1 Gesteuerungskosten
- 2 Treibhausgasemissionen
- 3 Auswirkungen auf die Biodiversität

Bis auf wenige Ausnahmen erzeugen alle verglichenen Technologien auch im Sommerhalbjahr Strom (*Beispiel Photovoltaikanlagen auf Dächern: Diese produzieren im Sommer rund 70 Prozent ihres Jahresertrags*). Daraus ergibt sich die Frage, wie der Sommerstromanteil bei Kosten und Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen ist, wenn es in erster Linie darum geht, Winterstrom zu erzeugen (*Bsp. PV-Anlagen auf Dächern: Welches sind die «fairen» Gesteuerungskosten und Treibhausgasemissionen für 1 TWh Winterstrom?*)

Um diesen unterschiedlichen Anteilen Rechnung zu tragen, definieren wir für die Bewertung der Gesteuerungskosten und Treibhausgasemissionen eine untere und obere Limite und bilden den Mittelwert daraus:

- Die untere Limite bilden die Kosten (bzw. Treibhausgasemissionen) ohne Berücksichtigung der Aufteilung in Winter- und Sommerhalbjahr.

(*Bsp. PV-Anlagen auf Dächern: 10.0 Rp/kWh*)

- Die obere Limite besteht aus den Gesteuerungskosten (Treibhausgasemissionen) der zu installierenden Leistung für ein TWh Winterstrom.

(*Beispiel PV-Anlagen auf Dächern: $\frac{10.0 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}}{100\% - 69\%} \approx 32.3 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}$*)

- Zur Beurteilung wird der Mittelwert gebildet.

(*Beispiel PV-Anlagen auf Dächern: $\frac{10.0 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}} + 32.3 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}}{2} \approx 21.1 \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}}$*)




Auswirkungen auf die Biodiversität: Das Expertenpanel berücksichtigte den höheren Flächenverbrauch einzelner Optionen für die Produktion von Winter- vs. Sommerstrom in seiner Bewertung.

1.6 Energieerzeugungs-Optionen

1.6.1 Photovoltaik auf Dächern und an Fassaden

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen ²	Kosten ²
	 90 000 t CO ₂ eq	 210 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
11 TWh	31%

Annahmen und Abschätzungen

Geeignete Dachflächen	Bei der Berechnung des Solarpotenzials auf Dächern haben wir nur Flächen von mindestens 10 m ² mit guter Sonneneinstrahlung berücksichtigt und angenommen, dass 30 Prozent der Dachflächen nicht für die Installation von PV-Modulen geeignet sind. Die Schweiz verfügt über eine Gesamtdachfläche von rund 231 km ² [7].
Geeignete Fassadenflächen	Es wurden ausschliesslich Flächen berücksichtigt, die mindestens 20 m ² Fläche aufweisen sowie über eine mittlere bis hervorragende Sonneneinstrahlung verfügen. Je nach Gebäudetyp wurden 45–60 Prozent für die Montage von PV-Modulen einbezogen.
Potenzial	Das Ausbaupotenzial für den Winterstrom bis 2035 wurde mit folgenden Annahmen abgeschätzt: Gemäss [7] beträgt das gesamte Potenzial 67 TWh. Davon sind im Idealfall 34 Prozent bzw. knapp 23 TWh Winterstrom. Laut Swissolar-Geschäftsleiter David Stickerberger [8] müssten und könnten bis 2025 jährlich 1 GW Solarstrom zugebaut werden, anschliessend das Doppelte. Gemäss BFE [9] ist der Zubau von einem GW 2022 bereits erreicht worden, nach 700 MW im Vorjahr. Aufgrund von Skalen- und Lerneffekten gehen wir davon aus, dass der Zubau jährlich um 30 Prozent gesteigert werden kann. Bis 2035 sind somit – konservativ gerechnet – rund 35 TWh zusätzlicher Solarstrom möglich. 31 Prozent (s.u.) davon entsprechen knapp 11 TWh Winterstrom.
Anteil Winterstrom	Optimistische Schätzungen rechnen mit einem Winterstrom-Anteil von 34 Prozent an der Jahresproduktion. Der aktuelle Wert liegt bei 27 Prozent. Als Wert bis zum Jahr 2035 wurde der Mittelwert verwendet (30.5 Prozent).

² Treibhausgasemissionen und Kosten berücksichtigen die Stromproduktion im Sommerhalbjahr (s. 1.6).

Stromgestehungskosten Es wurde der Durchschnitt von 10 Rp/kWh nach [10] verwendet.

Treibhausgase 41.7 g CO₂eq gemäss Umweltbilanz Strommix Schweiz 2018 [11].

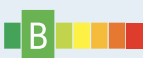


Biodiversität Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0.8
Qualität der Fläche	3.9
Landschaftszerschneidung	0
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	1.4
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	1.5
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	2.9
Total	10.5

1.6.2 Photovoltaik auf Infrastrukturen

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kostenspanne
	 90 000 t CO ₂ eq	 120-220 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
2 TWh	31%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial Eine Studie von EZS [12] weist das technische und das realisierbare Potenzial aus. Bei der Schätzung des realistischen Potenzials werden wirtschaftliche und regulatorische Faktoren berücksichtigt. Es wird angenommen, dass bis 2035 das gesamte realisierbare Potenzial ausgeschöpft werden kann.

Anteil Winterstrom Gleicher Anteil wie Photovoltaik auf Dächern und Fassaden: 30.5 Prozent (s.o.).

Stromgestehungskosten Die Gestehungskosten von PV auf Infrastrukturanlagen variieren zwischen und innerhalb verschiedener Infrastrukturkategorien stark. Die Gestehungskosten wurden der Studie [12] entnommen und eine Kostenpanne berechnet.

Treibhausgase Für die Treibhausgasemissionen wurde wie bei PV auf Dächern und an Fassaden der Wert gemäss [11] verwendet.

Biodiversität




Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0.5
Qualität der Fläche	5.1
Landschaftszerschneidung	2.6
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	1.4
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	1.1
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	4.0
Total	14.7

1.6.3 Photovoltaik in hochalpinen Lagen

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
High Impact	 60 000 t CO ₂ eq	 200 Millionen CHF
Low Impact	 60 000 t CO ₂ eq	 200 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
High impact	2 TWh
Low impact	2 TWh
53%	

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Die Studie «Alpenstrom jetzt!» [13] schätzt das Produktionspotenzial in alpinen Lagen auf 41 TWh pro Jahr. Faktoren, wie der Abstand zu Verkehrsinfrastruktur, Mindestgrösse von Flächen etc. sind berücksichtigt. Das Ausbaupotenzial bis 2035 haben wir aufgrund des erheblichen Zeitaufwands von Planungs-, Bewilligungs- und Bauprozessen auf 20 Prozent oder rund 8 TWh geschätzt.
Anteil Winterstrom	Gemäss [13].
Stromgestehungskosten	Die Gestehungskosten von PV in hochalpinen Lagen variieren je nach Standort stark. Die Gestehungskosten wurden der Studie [13] entnommen.
Treibhausgase	Für die Treibhausgasemissionen wurde wie bei PV auf Dächern und an Fassaden der Wert gemäss [11] verwendet und mit dem entsprechenden Winterstromanteil verrechnet.

Biodiversität

Die Auswirkung auf die Biodiversität durch alpine Solaranlagen ist stark abhängig vom Standort. In so genannten High-Impact-Gebieten, die besonders schützenswert sind, ist der Schaden auf die Biodiversität verglichen mit anderen Technologieoptionen sehr gross. In Low-Impact-Gebieten sind die Auswirkungen geringer.



Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung High Impact	Bewertung Low Impact
Neu beeinträchtigte Naturfläche	5.3	5.3
Qualität der Fläche	22.7	15.0
Landschaftszerschneidung	12.9	9.4
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	11.7	7.1
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	5.4	4.1
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	15.1	8.6
Total	73.1	49.5

1.6.4 Photovoltaik auf Landwirtschaftsflächen

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
		
	90 000 t CO ₂ eq	160 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
2 TWh	31%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial und Anteil Winterstrom Das Potenzial bis 2035 und der Anteil Winterstrom wurden einer Studie der ZHAW [14] entnommen.

Stromgestehungskosten Für die Berechnung der Stromgestehungskosten wurde der Mittelwert verschiedener Anlagenvarianten (6.0 und 8.4 Rp. pro kWh) gebildet [14].

Treibhausgase Für die Treibhausgasemissionen wurden wie bei PV auf Dächern und an Fassaden der Wert gemäss [11] verwendet.

Biodiversität




Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	9.0
Qualität der Fläche	7.3
Landschaftszerschneidung	7.1
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	4.0
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	3.0
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	4.9
Total	35.3

1.6.5 Kleinwasserkraftwerke

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität		Treibhausgasemissionen	Kosten
High Impact		 20 000 tCO ₂ eq	 320 Millionen CHF
Low Impact		 20 000 tCO ₂ eq	 320 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr	
High Impact	0.15 TWh	34%
Low Impact	0.05 TWh	
Bausteine aus Gründen der Stabilität nicht massstabsgetreu		

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial

Das Bundesamt für Energie schätzt das langfristige Potenzial auf ca. 0.1 bis 0.5 TWh. Da bei der Wasserkraft keine weiteren innovationsbedingten Kostensenkungen erreicht werden können und verschiedene Anpassungen bestehender Anlagen an minimale Umweltstandards anstehen, ist nur schon der Erhalt bestehender Kraftwerkskapazitäten eine Herausforderung. Um das maximale Potenzial von 0.5 TWh zu erschliessen, bräuchte es wahrscheinlich zeitlich unbeschränkte neue Förderbeiträge für bestehende und neue Anlagen [30]. Infrastrukturkraftwerke (z.B. Turbinen, die den überschüssigen Druck in einer Trinkwasserversorgungsanlage nutzen) haben kleine Auswirkungen auf die Biodiversität (s.u.), ihr Ausbaupotenzial ist aber begrenzt. Unter dem Strich

rechnen wir mit einem Potenzial von gesamthaft 0.2 TWh, 0.05 TWh davon durch Infrastrukturwerke.

Anteil Winterstrom	Eine Analyse der Produktionsdaten von Kleinwasserkraftwerken ergab einen Winterproduktionsanteil von 34 Prozent [31].
Stromgestehungskosten	Schätzungen zu den Gestehungskosten gehen weit auseinander (z.B. 22 bis 43 Rp/kWh [32], 8.6 bis 30.4 Rp/kWh [33] oder 14 bis 33 Rp/kWh [10]). Die Gestehungskosten neuer Anlagen sind in der Regel höher, da die günstigsten Standorte bereits erschlossen sind. Die Kosten für eine TWh Strom kann so, aufgrund von Gestehungskosten von etwa 10-30 Rp., auf 100 bis 300 Mio. Franken geschätzt werden. Aufgrund der bisherigen Förderung [34] und einer angenommenen Steigerung der Kosten von rund 20 Prozent [10] sind durchschnittliche Gestehungskosten von mindestens 16 Rp/kWh wahrscheinlich. Für den Winterstromanteil ergibt dies gemäss Abschnitt 1.6 einen Preis von rund 320 Mio. CHF/TWh.
Treibhausgase	Treibhausgasemissionen sind bei der Wasserkraft sehr anlagenspezifisch. Schätzungen [10, 35] reichen von 4 bis 17 g CO ₂ eq/kWh. Zur Vereinfachung wird die Produktion einer TWh Strom aus Wasserkraft auf 10 000 Tonnen CO ₂ eq pro Jahr festgelegt.
Biodiversität	Die Biodiversität leidet pro GWh produzierten Strom bei Klein- und Kleinstwasserkraft verhältnismässig stärker als bei grossen Anlagen. Die meisten grossen Fliessgewässer der Schweiz sind durch Wasserkraftanlagen beeinträchtigt; kleinere Gewässer bieten oft letzte wenig gestörte Lebensräume. Die Anlagen an natürlichen Gewässern fallen in die High-Impact-Kategorie. Sogenannte Infrastrukturanlagen, die zum Beispiel den überschüssigen Druck von Trinkwassersystemen nutzen, verursachen minimale Auswirkungen auf die Biodiversität (Low-Impact-Kategorie).




Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung High Impact	Bewertung Low Impact
Neu beeinträchtigte Naturfläche	4.7	0
Qualität der Fläche	23.6	0
Landschaftszerschneidung	16.0	0
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	13.4	0
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	3.6	0
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	16.3	0
Total	77.7	0

1.6.6 Erhöhung bestehender Staumauern

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
		
	10 000 t CO ₂ eq	150 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
1 TWh	100%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Das Konfliktpotenzial von Staumauererhöhungen ist meist kleiner als jenes von neuen Anlagen. Die Wahrscheinlichkeit, dass bestehende Projekte tatsächlich realisiert werden, ist deshalb relativ hoch [36]. Bis 2035 könnte die Produktion im Winterhalbjahr um schätzungsweise eine Terawattstunde erhöht werden. Der effektive Zubau an totaler Produktion über das ganze Jahr ist allerdings um einiges geringer.
Anteil Winterstrom	Diese Art von Projekten soll die Speicherkapazität im Winter erhöhen. Wir rechnen daher mit einem Winterstromanteil von 100 Prozent.
Stromgestehungskosten	Die Gestehungskosten für Grosswasserkraftprojekte werden auf 7 bis 30 Rp/kWh geschätzt [10]. Da die Wirtschaftlichkeit von Staumauererhöhungen begrenzt ist, weil ein grosser Teil der Produktion nur verschoben wird, rechnen wir mit 15 Rp/kWh.
Treibhausgase	Treibhausgasemissionen sind bei der Wasserkraft sehr anlagenspezifisch. Schätzungen [10, 35] reichen von 4 bis 17 g CO ₂ eq/kWh. Zur Vereinfachung wird die Produktion einer TWh Strom aus Wasserkraft auf 10 000 Tonnen CO ₂ eq pro Jahr festgelegt.
Biodiversität	Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0.1
Qualität der Fläche	13.3
Landschaftszerschneidung	5.1
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	6.9
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	2.1
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	7.1
Total	34.6

1.6.7 Aus- oder Neubau von Grosswasserkraftwerken

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität		Treibhausgasemissionen	Kosten
High Impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		15 000 tCO ₂ eq	170 Millionen CHF
Low Impact			\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$
		15 000 tCO ₂ eq	170 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035		Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
High Impact	0.5 TWh	50%
Low Impact	0.5 TWh	
Für Bausteine gerundet auf je 1 TWh.		

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Die Wahrscheinlichkeit, dass Grosswasserkraftprojekte realisiert werden können, ist sehr unterschiedlich. Bei Anlagen, die grosse Auswirkungen auf die Umwelt haben (High Impact), dürfte die Abwägung durch Behörden und Gerichte so aufwändig sein, dass nur die wenigsten bis 2035 realisiert werden könnten. Aufgrund vorhandener Daten und Berichte [15, 36] kann abgeschätzt werden, dass für beide Impact-Kategorien ein Produktionspotenzial von je einer halben Terawattstunde besteht.
Anteil Winterstrom	Der Winterstrom-Anteil unterscheidet sich relativ stark je nach Art und Standort einer Anlage (alpine Speicher, Schwallkraftwerke, Laufwasserkraft). Grob geschätzt fällt etwa die Hälfte des Potenzials im Winter an.
Stromgestehungskosten	Die Gestehungskosten werden in der Literatur auf 7-30 Rp/kWh geschätzt [10]. Für die in dieser Analyse betrachteten Anlagen rechnen wir mit durchschnittlichen Kosten von 10 bis 15 Rp, wobei Anlagen der High-Impact-Kategorie leicht tiefere Kosten aufweisen als solche der Low-impact-Kategorie, da diese auch relativ teure Schwall-Ausleitkraftwerke beinhaltet.
Treibhausgase	Treibhausgasemissionen sind bei der Wasserkraft sehr anlagenspezifisch. Schätzungen [10, 35] reichen von 4 bis 17 g CO ₂ eq/kWh. Zur Vereinfachung wird die Produktion einer TWh Strom aus Wasserkraft auf 10 000 Tonnen CO ₂ eq pro Jahr festgelegt.
Biodiversität	Die Auswirkungen auf die Biodiversität sind stark abhängig vom individuellen Projekt und seinem Standort. Die Erweiterung bestehender Anlagen hat tendenziell weniger Auswirkungen (Low-Impact-Kategorie) als neue Projekte (High-Impact-Kategorie). Erweiterungsprojekte fallen in die High-Impact-Kategorie, wenn sie Gewässer mit Schutzstatus betreffen (z.B. Auen, Amphibienlaichgebiete, Moore oder UNESCO-Gebiete).

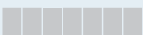


Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung High Impact	Bewertung Low Impact
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0.7	0.8
Qualität der Fläche	17.6	26.1
Landschaftszerschneidung	8.6	17.7
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	10.6	17.4
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	3.4	6.2
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	11.7	18.0
Total	52.5	86.3

1.6.8 Nachrüstung Atomkraftwerke

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kostenspanne
	 20 000 t CO ₂ eq	 40 - 520 Mio. CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
12 TWh	58%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Bestehende Kraftwerke dürfen betrieben werden, solange sie sicher sind [15]. Bei einer Laufzeit von 50 Jahren (gemäss Energieperspektiven 2050+), wären im Jahr 2035 alle Schweizer AKW ausser Betrieb. Sollten sie über diesen Zeitpunkt hinaus betrieben werden, legen wir die gemittelte Energiemenge zugrunde, die in den Jahren 2020-2022 produziert wurde.
Anteil Winterstrom	AKW laufen mit einer konstanten Energieproduktion. Allerdings werden sie durchschnittlich einen Monat pro Jahr im Sommer für Revisionen abgeschaltet. Aus diesem Grund und wegen einer höheren Effizienz bei kalten Temperaturen wird durchschnittlich mehr Strom im Winterhalbjahr produziert. Den Anteil Winterstrom haben wir anhand der Produktionsdaten der Winterhalbjahre 20/21, 21/22 und 22/23 bestimmt.
Gestehungskosten	Die Gestehungskosten für Strom aus AKW liegen zwischen 4 und 6 Rappen pro kWh [17]. Die International Energy Agency (IEA) und die Nuclear Energy Agency (NEA) untersuchten die Gestehungskosten von Strom aus AKW, deren Betriebsdauer um 10, resp. 20 Jahre verlängert wird [18]. IEA und NEA gehen davon aus, dass die Verlängerung keine grösseren Auswirkungen auf die Stilllegungskosten hat und dass die anfänglichen Stilllegungskosten über




die ursprüngliche Lebensdauer weitgehend zurückgestellt wurden. Die Stromgestehungskosten bei einer Verlängerung um 20 Jahre und einem Diskontierungssatz von 7 Prozent betragen knapp 3 Rp/kWh. Da allerdings ein nachgerüstetes AKW jederzeit vom ENSI aufgrund neuer Erkenntnisse als unsicher eingestuft werden kann, muss für die Kosten eine Spanne angenommen werden: 3 bis 30 Rp/kWh. Die höchste Schätzung betrifft Fälle, in denen eine erneute Nachbesserung wenige Jahre nach bereits erfolgter Nachrüstung fällig wird. Da ein Weiterbetrieb ein anhaltendes GAU-Risiko mit sehr hohen finanziellen und gesellschaftlichen Kosten bedeutet, wird dieser Kostenbereich auf dem Baustein für AKW ausgewiesen.

Treibhausgase	Die Treibhausgasemissionen belaufen sich für Druckwasserreaktoren auf 14.2 g CO ₂ eq und für Siedewasserreaktoren auf 15.9 g CO ₂ eq [11]. Bei der Berechnung der Emissionen pro TWh Winterstrom wurden diese Faktoren anteilig der jeweiligen Produktion im Jahr 2021 verrechnet. Dies ergibt einen Wert von 14.6 g CO ₂ eq.
Biodiversität	Diese Bewertung kann die GAU-Problematik nicht adäquat abbilden – deshalb wird auf den Bausteinen auf eine Wertung verzichtet (graue Farbe).

1.6.9 Gaskraftwerke

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
		
	610 000 t CO ₂ eq	180 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
2 TWh	100%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Gemäss Empfehlung ECom [19]: Zwei Gaskraftwerke mit insgesamt 1118 MW Leistung. Das Potenzial der Jahresproduktion leitet sich aus einem Worst-Case-Szenario ab, in welchem 2.2 TWh Strom von den Reservegaskraftwerken benötigt werden.
Anteil Winterstrom	Da es sich bei den Gaskraftwerken um Reservekraftwerke handelt, beträgt der Winterstromanteil 100 Prozent. Im Sommer sind die Kraftwerke nicht in Betrieb.
Gestehungskosten	Die Gestehungskosten sind stark abhängig von der produzierten Strommenge über die Lebensdauer des Kraftwerks. Annahme: Worst-Case-Szenario (2.2 TWh pro Jahr), Lebensdauer 30 Jahre. Die Investitions-, die jährlichen fixen und variablen Betriebskosten wurden dem ECom-Bericht entnommen [19].
Treibhausgasemissionen	Nach der <i>Umweltbilanz Strommixe 2018</i> betragen die Emissionen pro kWh rund 613.7 g CO ₂ eq [11].
Biodiversität	Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität in der Schweiz wie folgt:

Indikator	Bewertung
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0
Qualität der Fläche	7.7
Landschaftszerschneidung	2.3
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	4.9
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	11.1
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	2.6
Total	28.6

1.6.10 Windkraftwerke

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität		Treibhausgasemissionen	Kosten
High Impact		20 000 tCO ₂ eq	220 Millionen CHF
Low Impact		20 000 tCO ₂ eq	220 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
High Impact	2 TWh
Low Impact	2 TWh
67%	

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial

Für die Abschätzung des Windpotenzials bis 2035 verwenden wir zwei Szenarios und berücksichtigen zusätzlich die vom Parlament vorgesehene Beschleunigung (Stand Sommer 2023).

Erstes Szenario

Im Auftrag des BAFU wurde ein «nachhaltiges Potenzial» für Windenergie bestimmt [20]. Dieses basiert auf dem technischen Potenzial, das alle bebaubaren Flächen ohne nicht erschlossene Gebiete umfasst. Davon ausgeschlossen werden:

- Geschützte Gebiete gemäss Konzept Windenergie des Bundes
- Bewohnte Gebiete (inkl. Puffer von 300 Metern (Lärmschutz))
- Gebiete, die gemäss Windatlas 2019 über zu wenig Wind verfügen

- Ein Abzug von 15 Prozent des Gesamtpotenzials, um Einschränkungen durch geheime Anlagen des VBS oder Störungen von Flugsicherungsanlagen abzubilden

Es resultieren potenzielle 29.5 TWh. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass dieses Potenzial bis 2035 ausgeschöpft ist. Folgende Tabelle zeigt, dass sich Ende 2022 Projekte mit einem Potenzial von rund 1.7 TWh im Planungs- und Bewilligungsprozess befanden [21]. Da diese Prozesse generell lange dauern (>10 Jahre), wird von einem Potenzial bis 2035 von 4 TWh ausgegangen. Zum Vergleich: Die Energiestrategie 2050+ geht von bis zu 4.3 TWh Strom durch Windkraft im Jahr 2050 aus [2]. Die Studie Energiezukunft 2050 rechnet mit 3 TWh pro Jahr bis 2050 [22].

Phase Verfahren	Anzahl Projekte	Leistung	Energieproduktion
Baubewilligung vom Bundesgericht erteilt	1	14 MW	22 GWh/a
Nutzungspläne vom Bundesgericht validiert Baubewilligungsverfahren	6	83 MW	162 GWh/a
Vor Bundesgericht blockiert	4	148 MW	305 GWh/a
Vor Kantonsgericht blockiert	2	14 MW	26 GWh/a
Im Bewilligungsverfahren	6	159 MW	288 GWh/a
Vorprojekt	29	478 MW	916 GWh/a
Total	48	896 MW	1 719 GWh/a

Zweites Szenario

Der Kanton Zürich möchte bis 2050 jährlich mit Windkraft rund 800 GWh produzieren [23]. Der Ausbau soll ab 2030 erfolgen. Ein konstanter Ausbau entspräche 40 GWh zusätzliche Kapazität pro Jahr. Dementsprechend könnten bis 2035 200 GWh Kapazität oder ein Viertel des Potenzials erreicht werden. In diesem Szenario gehen wir davon aus, dass die Pläne des Kantons Zürich auch von den anderen Kantonen umgesetzt werden. Das heisst, bis 2035 wird ein Viertel des Windpotenzials der Schweiz ausgeschöpft. Dies entspricht 7.37 TWh. Da der Winterstromanteil von Windkraft etwa 67 Prozent beträgt (s.u.), ergeben sich daraus rund 4.9 TWh Winterstrom.

In der Bilanz beider Szenarien und unter Berücksichtigung des vom Parlament vorgesehenen beschleunigten Ausbaus der Windkraft rechnen wir mit einem Potenzial von 4 TWh Winterstrom im Winter 2035/36.

Anteil Winterstrom	Der Anteil schwankt regional und liegt zwischen 55 bis 70 Prozent [20]. Im Schnitt kann von 2/3 im Winter und 1/3 im Sommer ausgegangen werden [24].
Gestehungskosten	Die Gestehungskosten liegen zwischen 15 und 20 Rappen pro kWh [10]. Der Jahresertrag ist der wichtigste Einflussfaktor, an Standorten mit besonders guten oder schlechten Windbedingungen können Kosten und THG-Emissionen ausserhalb der angegebenen Bandbreiten liegen.
Treibhausgase	Die Treibhausgasemissionen pro kWh produzierten Stroms aus Windkraft belaufen sich auf 17.3 g CO ₂ eq [11]. Es ist nicht zu erwarten, dass sich dies stark verändert. Eine Abnahme würde aus effizienterer Nutzung des Windes resultieren, eine Zunahme aus schlechteren verfügbaren Standorten [10].
Biodiversität	Die Expert:innen differenzierten zwischen sensiblen und weniger sensiblen Gebieten in Bezug auf Arten und Ökosysteme. Als High-Impact-Gebiete zählen BLN-Flächen oder manche Wälder. Das Winterstrompotenzial bis 2035 verteilen wir hälftig auf die beiden Impact-Kategorien.




Die Expert:innen bewerteten die Auswirkungen auf die Biodiversität wie folgt:

Indikator	Bewertung High Impact	Bewertung Low Impact
Neu beeinträchtigte Naturfläche	0.4	0.4
Qualität der Fläche	25.3	13.7
Landschaftszerschneidung	15.4	11.7
Regionale Auswirkung auf Ökosysteme	13.4	8.0
Verschmutzung, Lärm- und Wärmeemission	7.5	5.6
Auswirkung auf Tier- und Pflanzenarten	18.0	9.4
Total	80.0	48.8

1.6.11 Effizienz

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

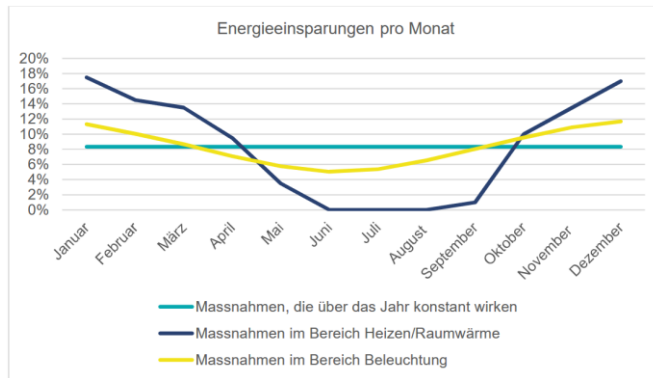
Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
	 10 000 t CO ₂ eq	 40 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
7 TWh	67%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Das technische Einsparpotenzial von 25 bis 40 Prozent [25] wird auf den Stromverbrauch 2021 [1] angewendet. Damit ergibt sich ein Einsparpotenzial von 14 bis 23 TWh pro Jahr. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass dieses Potenzial nur teilweise ausgeschöpft werden wird, selbst wenn es sich ökonomisch lohnen würde. Wir gehen für 2035 von einem Potenzial von 10 TWh aus.
Anteil Winterstrom	Die Einsparungen in den Bereichen Raumwärme und Beleuchtung finden mehrheitlich in den Wintermonaten statt. Aus folgender Grafik aus einem Bericht des BFE zum Stromspar-Potenzial lässt sich herauslesen, dass um die 2/3 der Einsparungen in den Wintermonaten stattfinden.



- Gestehungskosten** Das Einspar-Potenzial von 25 bis 40 Prozent bezieht sich in den meisten Fällen auf ein wirtschaftliches Potenzial, d.h. die Massnahmen resultieren für die Konsumenten über den Lebenszyklus betrachtet in einer finanziellen Einsparung [25]. Trotzdem bilden finanzielle Hemmnisse eine relevante Hürde bei der Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen. Das Förderprogramm Pro-Kilowatt des BFE nutzt ein Auktionsverfahren, um die Stromeffizienzmassnahmen mit der besten Kostenwirksamkeit zu fördern. Diese Fördermittel betragen im Durchschnitt 2.8 Rp/kWh Strom und werden von uns als Annäherung genutzt [26].
- Treibhausgase** Auch Effizienzmassnahmen haben einen Fussabdruck. Sparsame drehzahlgesteuerte Motoren sind z.B. aufwändiger in der Produktion. Viele Massnahmen sind aber mit wenig Zusatzaufwand möglich und eine präzise Abschätzung aufgrund des Massnahmen-/Technologiemixes ist nicht möglich. Deshalb rechnen wir mit den Emissionen der saubersten Stromproduktionsarten.
- Biodiversität** Nicht relevant, resp. beste Kategorie

1.6.12 Suffizienz

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kosten
	0 t CO ₂ eq	0 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
3 TWh	50%

Annahmen und Abschätzungen

- Potenzial** Eine Abschätzung ist schwierig, sie soll deshalb nur Ansatzpunkte liefern. Eine Studie [27], die den Stromverbrauch von rund 10 000 Schweizer Haushalten untersuchte, deckte grosse Unterschiede auf: Die zehn Prozent sparsamsten Haushalte verbrauchten nur 39 Prozent der Strommenge der Median-Haushalte. Nimmt man an, dass alle Median-Haushalte so sparsam werden wie jene

in der 10-Prozent-Perzentile und rechnet dies auf die Gesamtzahl aller Schweizer Haushalte hoch, so ergibt dies ein Suffizienz-Potential von rund 6 TWh. Dies ist konservativer, als es scheint, da das Potenzial der Haushalte zwischen dem Median und der 100-Prozentperzentile gar nicht in diese sehr grobe Rechnung einfließt.

Eine andere Abschätzung ist mithilfe einer Studie der Organisation Negawatt [28] möglich. Sie zeigt auf, dass in der Schweiz mit Suffizienz-Massnahmen etwa die Hälfte der Energiemenge eingespart werden kann, die mit Effizienz-massnahmen erreicht werden kann. Basierend auf der Abschätzung des Effizienzpotenzials (s.o.) bedeutet dies ein Potenzial von 5 TWh.

Im Durchschnitt resultieren 5.5 TWh.

Anteil Winterstrom	Wir gehen davon aus, dass sich das Potenzial im Winter und Sommer in ähnlichem Mass ausschöpfen lässt, d.h. es resultieren rund 3 TWh. Allerdings ist bei dieser Zahl Vorsicht geboten: Die Abschätzung ist wie erwähnt sehr grob – und Forschung und Erfahrung zeigen, dass sich Suffizienz-Potenziale nur schwer realisieren lassen.
Gestehungskosten	Die meisten Suffizienz-Massnahmen bestehen darin, dass eine Energiedienstleistung weniger oder gar nicht in Anspruch genommen wird. Dies mag manchmal Opportunitätskosten nach sich ziehen, bringt aber auch Einsparungen. Wir rechnen deshalb unter dem Strich mit keinen Kosten.
Treibhausgase	Analog zu den Überlegungen zu den Gestehungskosten rechnen wir mit keinem THG-Ausstoss.
Biodiversität	Nicht relevant, resp. beste Kategorie

1.6.13 Stromimporte

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität		Treibhausgasemissionen	Kosten
fossil			
		750 000 t CO ₂ eq	200 Millionen CHF
Wind und Sonne			
		20 000 t CO ₂ eq	50 Millionen CHF

Potenzial Winterstrom

Zusätzlich möglicher Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr	
fossil	5 TWh	100%
Wind und Sonne	5 TWh	100%

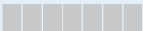
Annahmen und Abschätzungen

Potenzial	Das Potenzial des Stromimports ist abhängig von der Kapazität des Stromnetzes, von der Produktionskapazität im Ausland und vom Stromabkommen mit der EU. Unter Berücksichtigung der Stromzubauziele der EU – allein bis 2030 soll 600 GW zusätzliche Leistung aus PV-Anlagen installiert werden [29] – könnte vermutlich der gesamte zusätzliche Winterstrombedarf der Schweiz mit Importstrom gedeckt werden. Aufgrund der bestehenden Netzkapazitäten und der erwarteten Beschränkungen im Stromverkehr mit der EU rechnen wir mit einem Potenzial von gesamthaft 10 TWh. Davon sind 5 TWh Strom aus fossiler Erzeugung, die in Zeiten knapper Versorgung («Dunkelflaute») importiert werden und 5 TWh Wind- und Solarstrom, der in Überflusszeiten importiert wird.
Anteil Winterstrom	Der Winterstromanteil beträgt 100 Prozent, da nur Strom im Winterhalbjahr importiert werden muss.
Stromgestehungskosten	Der Preis für fossil generierten Strom wird auf 200 Fr/MWh geschätzt, jener für Wind- und Solarstrom auf 50 Fr/MWh.
Treibhausgase	Als Treibhausgasintensität legen wir für den fossilen Importstrom einen Mix aus Kohle und Gas zugrunde, was Emissionen von 750 g CO ₂ eq/kWh entspricht. Für den Import von erneuerbar erzeugtem Strom rechnen wir mit 17,3 g CO ₂ eq/kWh.
Biodiversität	Die Bewertungsmethodik betrachtet nur die Auswirkungen in der Schweiz. Da der Grossteil der Auswirkungen von Importstrom bei der Erzeugung im Ausland anfällt, wird dies nicht bewertet. Die Bausteine sind deshalb grau.

1.6.14 Power to X

Übersicht

1 TWh Winterstrom verursacht

Auswirkungen auf die Biodiversität	Treibhausgasemissionen	Kostenspanne
	???	???

Potenzial Winterstrom

hypothetisches Potenzial Winterstrom 2035	Anteil Stromproduktion Winterhalbjahr
2 TWh	100%

Annahmen und Abschätzungen

Potenzial und Anteil Winterstrom	Viele Fachleute und Akteure im Energiesektor gehen davon aus, dass die sogenannte Power-to-X-Technologie künftig eine Rolle spielen wird, um überschüssigen erneuerbaren Strom aus dem Sommer in den Winter zu transferieren. Zum Beispiel kann aus Strom, der aus PV stammt oder aus Laufkraftwerken an Flüssen, zu Überschusszeiten mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff hergestellt werden. Dieser wird gespeichert und im Winter wird daraus in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen wieder Strom erzeugt. Aktuell ist es aber kaum möglich, aussagekräftige Abschätzungen zu Potenzial, Kosten etc. zu machen.
----------------------------------	---

Um jenen, die von der wichtigen künftigen Rolle der Technologie überzeugt sind, die Möglichkeit zu geben darauf zu setzen, enthält das «Power-Tower»-Set 2 TWh Strom aus Power to X.

Gestehungskosten	Keine Abschätzung möglich
Treibhausgase	Abhängig von der künftigen Produktionsart. Keine Abschätzung möglich
Biodiversität	Abhängig von der künftigen Produktionsart. Keine Abschätzung möglich

1.6.15 Joker

Manchmal reichen zehn Jahre und eine Technologie, die zuvor kaum im Blick war oder die noch tief im Entwicklungsstadium steckte, nimmt eine wichtige Rolle ein (Szenario Smartphone). Oder es gibt eine Technologie, von der Sie finden, wir haben ihr zu wenig zugetraut. Darum stehen 1 TWh Joker bereit.

2 Glossar

AKW	Atomkraftwerk
Bandenergie	Die Bandenergie bezeichnet den Grundbedarf an Strom, der jeden Tag rund um die Uhr verbraucht wird, z.B. werden AKW und Wasserkraftwerke an Flüssen (Laufkraftwerke) als Bandenergie-Kraftwerke bezeichnet.
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalent ist eine Masseinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase. Beispielsweise wird damit die deutlich stärkere Klimawirkung von Methan (CH ₄) berücksichtigt.
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EICom	Eidgenössische Elektrizitätskommission
GW	Gigawatt – Einheit für Leistung. 1 GW entspricht 1 Milliarde Watt. Zur Einordnung: Das AKW Gösgen hat eine elektrische Leistung von etwa 1 GW.
GWh	Gigawattstunde – Einheit für Energie. 1 GWh entspricht 1 Milliarde Wattstunden. Zur Einordnung: Das AKW Gösgen produziert in einer Stunde ungefähr 1 GWh elektrische Energie.
kW	Kilowatt – Einheit für Leistung. 1 kW entspricht 1000 Watt. Zur Einordnung: Ein Wasserkocher hat eine Leistung von etwa 1 kW.
kWh	Kilowattstunde – Einheit für Energie. 1 kWh entspricht 1000 Wattstunden. Zur Einordnung: Ein Wasserkocher verbraucht in einer Stunde rund 1 kWh elektrische Energie.
kWp	Die in der Photovoltaik gebräuchliche Abkürzung kWp steht für «Kilowatt-Peak». Sie gibt an, welche Höchstleistung in Kilowatt (kW) eine PV-Anlage erbringen kann.
Stromgestehungskosten	Umfassende Kosten, um elektrische Energie («Strom») zu erzeugen. Sie ergeben sich aus den Kapitalkosten, den Betriebskosten (fix und variabel), den Brennstoffkosten sowie der angestrebten Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum. Nicht inbegriffen sind Verteilung und bedarfsgerechte Pufferung der erzeugten elektrischen Energie.
TW	Terawatt – Einheit für Leistung. 1 TW entspricht 1 Billion Watt. Zur Einordnung: Dies entspricht etwas mehr als die Hälfte der weltweit benötigten elektrischen Leistung.
TWh	Terawattstunde – Einheit für Energie. 1 TWh entspricht 1 Billion Wattstunden. Zur Einordnung: Die Stadt Zürich braucht in einem Jahr rund 3 TWh Strom [28].
Winterstrom	Strom, der im Winterhalbjahr (Oktober bis März) erzeugt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] BFE, «Gesamte Erzeugung und Abgabe elektrischer Energie in der Schweiz 2021», 2022. Verfügbar unter: https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html/#tab_content_bfe_de_home_versorgung_statistik-und-geodaten_energiestatistiken_elektrizitaetsstatistik_jcr_content_par_tabs (abgerufen 29. November 2022)
- [2] BFE, «Energieperspektiven 2050+: Technischer Bericht», Bundesamt für Energie BFE, Ittigen, Dez. 2021. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA3ODM=.html> (abgerufen 29. November 2022)
- [3] Notiz des BFE vom 24. April 2023 zu Händen der UREK-S zu den Anträgen S151, S157, S150 und S154
- [4] Teske, S., Assaf, J., Kim, Y, (2020), «Energy [R]evolution: 100% Renewable Energy for Switzerland», December 2020
- [5] BFE, «Energieperspektiven 2050+: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse», Bundesamt für Energie BFE, Ittigen, Zusammenfassung, 2020. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA3ODM=.html> (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [6] BFE, «Wichtigste Neuerungen im Energierecht ab 2018». Bundesamt für Energie BFE. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvODg1Mg==.html> (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [7] N. Moro, D. Sauter, S. Strelbel, und J. Rohrer, «Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern», Jan. 2021, doi: 10.21256/ZHAW-2652.
- [8] Watson, «Solarboom in der Schweiz: Eine Branche zwischen Euphorie und Ärger», watson.ch, 31. März 2022. <https://www.watson.ch/l673729839> (abgerufen 25. November 2022).
- [9] BFE, «Förderung der erneuerbaren Stromproduktion 2023: 600 Millionen Franken für Photovoltaikanlagen», Förderung der erneuerbaren Stromproduktion 2023: 600 Millionen Franken für Photovoltaikanlagen, 24. November 2022. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-91897.html> (abgerufen 25. November 2022).
- [10] BFE und PSI, «Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen», Bern, 2019.
- [11] BAFU, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018», Bundesamt für Umwelt BAFU, Uster, 2021. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf.download.pdf/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf> (abgerufen 5. Dezember 2022)
- [12] EZS und EnergieSchweiz, «Solarstrom auf Infrastrukturanlagen und Konversionsflächen», Energie Zukunft Schweiz, 2021. Verfügbar unter: https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/7195893/Infrasolaire/Studie%20Infrasolaire_Endbericht.pdf (abgerufen 5. Dezember 2022)
- [13] F. Egli, L. Hälgi, M. Schreiber, und M. Schwarz, «Alpenstrom jetzt!», Stiftung Alpines Energieforschungszentrum AlpEnForCe, Altdorf. Verfügbar unter: https://www.kulturen-der-alpen.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente/Downloads/Studien___Publikationen/Alpenstrom_jetzt.pdf (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [14] M. Jäger u. a., «Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft», ZHAW, 2022.
- [15] UVEK, «Ausstieg aus der Kernenergie», Ausstieg aus der Kernenergie, 2017. <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz/kernenergie.html> (abgerufen 11. Dezember 2022).

- [16] Nuklearforum Schweiz, «Kernkraftwerk Leibstadt: Rückblick auf das Betriebsjahr 2021», Kernkraftwerk Leibstadt: Rückblick auf das Betriebsjahr 2021, 12. Januar 2022. <https://www.nuklearforum.ch/de/news/kernkraftwerk-leibstadt-rueckblick-auf-das-betriebsjahr-2021> (abgerufen 19. Dezember 2022).
- [17] BFE und PSI, «Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies», 2017.
- [18] IEA und NEA, «Projected Costs of Generating Electricity», 2020.
- [19] EICom, «Konzept Spitzenlast-Gaskraftwerk zur Sicherstellung der Netzsicherheit in ausserordentlichen Notsituationen», Eidgenössische Elektrizitätskommission EICom, Bern, Bericht zuhanden Bundesrat, 2021. Verfügbar unter: <https://www.elcom.admin.ch/dam/elcom/de/dokumente/2022/konzeptspitzenlastgaskraftwerk.pdf.download.pdf/Konzept%20Spitzenlast-Gaskraftwerk.pdf> (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [20] BFE, «Windpotenzial Schweiz 2022», 2022. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/72771.pdf> (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [21] Suisse Éole, «Windenergie in der Schweiz in Zahlen», suisseéole, 2022. Verfügbar unter: https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2022/10/SE_02_20_FACTS-HEET_D_V3-1.pdf (abgerufen 7. Dezember 2022)
- [22] VSE, «Energiezukunft 2050», VSE, 2022. Verfügbar unter: <https://www.strom.ch/de/energiezukunft-2050/resultate#studienbericht> (abgerufen 8. Dezember 2022)
- [23] Baudirektion Kanton Zürich, «Windenergie kann Beitrag zur Winterstromversorgung im Kanton Zürich leisten», Kanton Zürich, 2022. <https://www.zh.ch/de/news-uebersicht/medienmitteilungen/2022/10/windenergie-kann-beitrag-zur-winterstrom-versorgung-im-kanton-zuerich-leisten.html> (abgerufen 10. Februar 2023).
- [24] Suisse Éole, «Windenergiestrategie: Winterstrom & Klimaschutz Analyse und Aktualisierung des Potenzials der Windenergie in der Schweiz», Suisse Éole, 2020. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAxMDk=.html> (abgerufen 8. Dezember 2022)
- [25] BFE, «Potenzial und Massnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz bis 2025», 2022. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/70290.pdf> (abgerufen 8. Dezember 2022)
- [26] ProKilowatt, «Wettbewerbliche Ausschreibungen für Stromeffizienz», 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/foerderung/energieeffizienz/wettbewerbliche-ausschreibungen-prokilowatt.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvODQyMA==.html> (abgerufen 25. Juli 2023)
- [27] Swiss Household Energy Demand Survey (SHEDS), <https://www.sccer-crest.ch/research/swiss-household-energy-demand-survey-sheds/> (abgerufen 25. Juli 2023)
- [28] «Das Szenario Negawatt» <https://www.negawattschweiz.org/szenario/#synthese> (abgerufen 25. Juli 2023)
- [27] Europäische Kommission, «REPowerEU: erschwingliche, sichere und nachhaltige Energie für Europa», 18. Mai 2022. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_de (zugegriffen 16. Dezember 2022)
- [28] Zürich, «Endenergiebilanz - Stadt Zürich», Endenergiebilanz - Stadt Zürich, 2022. https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/energie-in-zahlen/endenergiebilanz.html (abgerufen 25. November 2022).
- [29] Umweltallianz, «Sichere Schweizer Energieversorgung 2035», 2022 <https://energie-wende2035.umweltallianz.ch/> (abgerufen 3. August 2023)
- [30] BFE, «Wasserkraftpotenzial der Schweiz: Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050», 2019
- [31] Econcept, «Beitrag erneuerbarer Energien zur Winterstromproduktion: Analyse der Produktionsdaten», 2014 (im Auftrag des WWF)
- [32] VSE, «Kleinwasserkraft, Basiswissen-Dokument», 2014
- [33] BFE, «Überprüfung der Gestehungskosten und der Vergütungssätze von KEV-Anlagen», 2016

- [34] BFE, Medienmitteilung „Die kostendeckende Einspeisevergütung KEV ist wirksam«, 2012. Abrufbar unter <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-46401.html> (abgerufen am 14.8.2023)
- [35] Treeze, «Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018», 2019
- [36] BFE, Medienmitteilung «Runder Tisch Wasserkraft mit gemeinsamer Erklärung abgeschlossen» 2021. Abrufbar unter <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-86432.html> (abgerufen am 14.8.23)
- [37] BFE, «Runder Tisch Wasserkraft» Veröffentlichte Daten, 2022
- [38] BFE, Notiz des BFE vom 24. April 2023 zuhanden der UREK-S; 21.047: «Sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Bundesgesetz»



Unser Ziel

Gemeinsam schützen wir die Umwelt und gestalten eine lebenswerte Zukunft für nachkommende Generationen.

WWF Schweiz

Hohlstrasse 110
Postfach
8010 Zürich

Tel.: +41 (0) 44 297 21 21
wwf.ch/kontakt

Spenden:
wwf.ch/spenden