






Schritte zur fossilen Unabhängigkeit für die Schweiz

Expertengruppe «Versorgungssicherheit» – Positionspapier

Report**Author(s):**

Hug, Gabriela; Demiray, Turhan; Guidati, Gianfranco; [McKenna, Russell](#) ; Oswald, Kirsten; Patt, Anthony; [Saar, Martin O.](#) ; [Sansavini, Giovanni](#) ; [Schaffner, Christian](#) ; [Schwarz, Marius](#) ; Steffen, Bjarne

Publication date:

2022-06-17

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000556402>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Policy Brief

Expertengruppe Versorgungssicherheit

Positionspapier

Schritte zur fossilen Unabhängigkeit für die Schweiz

17. Juni 2022

Einleitung

Der russische Einmarsch in die Ukraine im Februar dieses Jahres hat deutlich gemacht, dass die Abhängigkeit von Erdgasimporten und anderen fossilen Brennstoffen Länder in Bezug auf die Energiesicherheit in eine prekäre Lage bringen kann. Diese Abhängigkeit bringt die europäischen Länder, darunter auch die Schweiz, in die widersprüchliche Lage, ein Land finanziell zu unterstützen, gegen das sie gleichzeitig Wirtschaftssanktionen verhängen und damit ihre eigene Wirtschaft belasten.

Die Schweiz importierte im Jahr 2020¹ rund 131 TWh² (oder 471 994 TJ³) Energie aus fossilen Quellen (Erdöl, Erdgas und Kohle), was etwa der Hälfte des Bruttoenergiebedarfs des Landes entspricht (BFE 2021b). Rechnet man die 70 TWh an importierten Kernbrennstoffen hinzu, so bezieht die Schweiz 72% ihres Bruttoenergiebedarfs aus dem Ausland. Der grösste Teil des importierten Erdgases gelangt aus Deutschland über die europäischen Fernleitungen in die Schweiz (Gaznat SA 2020). Bis vor Kurzem bezog Deutschland rund 55% seines Erdgases aus Russland (BP 2021). Sollte sich der energiepolitische Konflikt noch verschärfen oder sollten weitere hinzukommen, könnte die Schweiz bezüglich ihrer Energieversorgung in eine heikle Situation geraten.

Kürzlich hat der Schweizer Bundesrat die Planung von zwei bis drei Gaskraftwerke beschlossen, um den Spitzenbedarf an Strom, insbesondere im Winter, zu decken (Schweizer Bundesrat 2022) – dem Anschein nach ein Widerspruch zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Importen. Die bestehenden Gasspeicherkapazitäten in der Schweiz sind jedoch mit insgesamt rund 1,7 TWh sehr begrenzt. Gleichzeitig deuten grobe Schätzungen darauf hin, dass der Gasspeicherbedarf im Jahr 2050 die heutigen Kapazitäten weit übersteigen wird⁴. Daher sind der Ausbau der inländischen Gasspeicher und die Sicherung der Nutzung ausländischer Speicherkapazitäten durch regionale Koordinierung, Speichervereinbarungen und geeignete Preismechanismen für diesen Weg von entscheidender Bedeutung.

Angesichts der aktuellen energiepolitischen Entwicklungen, aber auch mit Blick auf die Klimastrategie der Schweiz (Schweizer Bundesrat 2021) und das Ziel, bis 2050 netto null Treibhausgasemissionen (THG) zu erreichen (Schweizer Bundesrat 2019), könnte eine drastische Reduktion der Schweizer Abhängigkeit von ausländischen Öl- und Gasimporten die logischere Strategie

¹ Wir sind uns bewusst, dass 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie ein besonderes Jahr war, aber die Grössenordnungen und Trends sind ähnlich wie in den Vorjahren.

² Die Werte für den Primärenergiebedarf beziehen sich auf die Menge der importierten Energieträger vor der Energieumwandlung zur Deckung des Endenergiebedarfs, zum Beispiel zur Stromerzeugung oder zum Heizen. Im Jahr 2021 wurden aus Kernbrennstoffen 18,39 TWh Strom erzeugt (energy-charts 2022), die Differenz zur importierten Menge ist auf Verluste bei der Energieumwandlung zurückzuführen.

³ 1 Terawattstunde [TWh] entspricht 3600 Terajoule [TJ]. In diesem Dokument sind alle Werte für Energie in TWh angegeben.

⁴ Der zusätzliche Bedarf an Energiespeichern im Jahr 2050 wird auf eine Grössenordnung von 2-10 TWh geschätzt (Fuchs et al. 2017). Wenn diese zusätzliche Energiespeicherung vollständig durch Gasspeicherung in Verbindung mit Gaskombikraftwerken (mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 64%) erfolgt, liegt der Bedarf an Gasspeicherung im Jahr 2050 in der Grössenordnung von 3,1-15,6 TWh. Die jährlichen Importe könnten im Jahr 2040 zwischen 10,3 und 11,7 TWh liegen (Garrison et al. 2020). Werden diese vollständig durch die nationale Stromerzeugung in Gaskombikraftwerken (mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 64%) in Verbindung mit einer Gasspeicherkapazität von (im Extremfall) einem ganzen Jahr ersetzt, dann liegt der Bedarf an Gasspeichern in der Grössenordnung von 16,1-18,2 TWh.

sein. In der Tat zeigen Studien, dass ein Energiesystem mit Netto-Null-Emissionen für die Schweiz bis 2050 sowohl technisch als auch wirtschaftlich machbar ist (Kannan et al. 2022; Landis et al. 2019), auch wenn die wahrscheinliche Verteilung von Kosten und Nutzen je nach Entwicklungspfad und Szenario sehr unterschiedlich ausfällt. Der gewählte Weg überschneidet sich stark mit dem Grad der Einbindung der Schweiz in das europäische Energiesystem bzw. der Notwendigkeit einer solchen Einbindung. Der Grad der daraus resultierenden Integration hat gegenüber der Autonomie eigene Kosten und Vorteile, die berücksichtigt werden sollten. Neben der Erfüllung der Verpflichtung der Schweiz im Rahmen des Pariser Abkommens könnte ein Netto-Null-Energiesystem im Vergleich zum heutigen Energiesystem einen erheblichen Mehrwert in Bezug auf Nachhaltigkeit, Gesundheit, Resilienz und Stärkung der lokalen Wirtschaft bringen.

Ein Netto-Null-Energiesystem ohne fossile Energieträger wird auf einer vielfältigen Kombination technischer, politischer und sozialer Massnahmen beruhen. Ein Patentrezept in Form einer einzigen Technologie, die das Problem lösen würde, existiert dabei nicht. Zu den erforderlichen Massnahmen gehören kohlenstoffarme Energiequellen auf der Angebotsseite, die Elektrifizierung von Sektoren wie Verkehr und Raumheizung und die Integration des Energiesystems über Energieinfrastrukturen und Sektoren wie Gas, Wärme und Strom. Viele dieser Massnahmen sind bereits heute wirtschaftlich, zum Beispiel verbesserte Gebäudedämmung, Wärmepumpen und häufig Elektrofahrzeuge; andere bedürfen der weiteren Entwicklung und/oder politischer Förderung, zum Beispiel bei der Luftfahrt und der Dekarbonisierung von Industrieprozessen. Andere Massnahmen erfordern möglicherweise politische und gesellschaftliche Unterstützung für potenziell umstrittene Technologien wie zum Beispiel Onshore-Windkraft oder eine Infrastruktur für den Transport und die Speicherung von CO₂. Die grössten Herausforderungen bei der Erreichung des Netto-Null-Treibhausgasemissionsziels sind jedoch nicht unbedingt technischer oder wirtschaftlicher, sondern vielmehr sozialer Natur: Ohne das Engagement der Gesellschaft können diese Ziele nicht erreicht werden. Umfrageergebnisse zeigen, dass die Schweizer Bürgerinnen und Bürger nahezu alle politischen Massnahmen, die die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen beenden und die Nutzung erneuerbarer Energien fördern würden, in hohem Masse unterstützen (Patt and Steffen 2022).

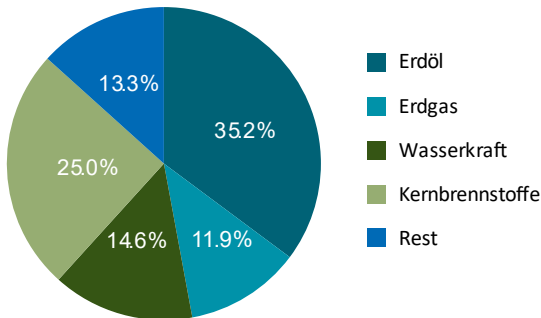
Die Expertengruppe «Versorgungssicherheit» des Energy Science Center der ETH Zürich präsentiert in diesem Positionspapier die wichtigsten Schritte auf dem Weg zu einem von fossilen Energieträgern unabhängigen Schweizer Energiesystem welche dazu beitragen, dass das Risiko von Versorgungsengpässen aufgrund politischer Konflikte reduziert wird. Gleichzeitig wird der Übergang zu einem treibhausgasneutralen Netto-Null-Energiesystem gefördert. Wir beginnen mit einer Beschreibung des aktuellen Status quo im Energiebereich, um die Reduktionspotenziale für die einzelnen Sektoren zu veranschaulichen, bevor wir Schritte hin zur Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen für die Nachfrage- und die Angebotsseite erarbeiten. Schliesslich skizzieren wir wertvolle Erkenntnisse darüber, wie dringlich Schweizer Bürgerinnen und Bürger die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und die Ziele der Klimaneutralität sehen.

Status Quo bei der Energieversorgung der Schweiz

Der Primärenergiebedarf der Schweiz beträgt ungefähr 278 TWh (oder 1 002 110 TJ), bei einem Endenergiebedarf von rund 208 TWh (BFE 2021b). Der Bedarf an Erdöl, Erdgas und Kohle wird

vollständig mit Importen aus dem Ausland gedeckt und beläuft sich auf rund 131 TWh (Abbildung 1). Weitere 70 TWh werden als Kernbrennstoffe importiert (BFE 2021b).

Primärenergiebedarf 278 TWh



Endenergiebedarf 208 TWh

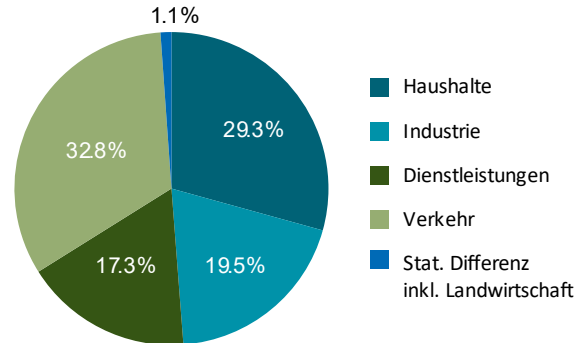
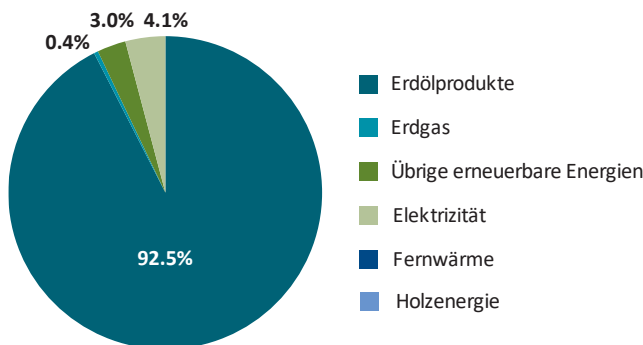


Abbildung 1. Die Grafik links zeigt den Primärenergiebedarf (278 TWh) als prozentuale Anteile der Energieträger in der Schweiz im Jahr 2020. Der «Rest» umfasst Kohle (etwa 0,4% oder 1 TWh). Rechts ist der Endenergiebedarf (208 TWh) als prozentuale Anteile der einzelnen Sektoren dargestellt. Angepasst aus BFE (2021b), für detaillierte Energieflussdiagramme und Informationen verweisen wir auf die BFE-Publikation.

Anhand des Einsatzorts der Energieträger (Abbildungen 1 & 2) wird klar, dass der Verkehrssektor das grösste Potenzial aufweist, um die Nachfrage nach fossilen Energieträgern zu senken (63 TWh fossile Energieträger, rund 70% aller Erdölprodukte) (BFE 2021b). Der Schweizer Verkehrssektor ist auch einer der grössten Verursacher von Treibhausgasemissionen mit insgesamt 15,66 Mt CO₂-Äquivalenten pro Jahr (einschliesslich internationalen Luft- und Schiffsverkehrs; die gesamten Treibhausgasemissionen des Landes betragen 43,4 Mt CO₂-Äquivalenten (BAFU 2022)). Beim Erdgas liegt das grösste Reduktionspotenzial bei den Haushalten/Gebäuden (50% des Endverbrauchs bei Erdgas) und der Fernwärme (BFE 2021b). Die Haushalte stellen rund 16,4% der gesamten Treibhausgasemissionen (7,12 Mt CO₂-Äquivalenten) (BAFU 2022)).

Energieträger Verkehr



Energieträger Haushalte

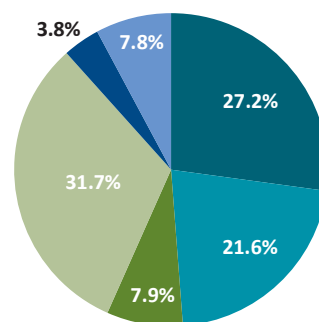


Abbildung 2. Prozentualer Anteil der Energieträger zur Deckung des Schweizer Energiebedarfs im Verkehr (~68 TWh) und in den Haushalten (~61 TWh) im Jahr 2020. Angepasst aus BFE (2021b).

Der Schweizer Industriesektor hat einen Endenergieverbrauch von 40 TWh (BFE 2021b), wovon rund 10 TWh (26%) durch Erdgas und 3 TWh (8%) durch Erdölprodukte gedeckt werden (Abbildung 3). Fossile Brennstoffe werden hauptsächlich zur Erzeugung von Prozesswärme mit einem Temperaturbereich von bis zu 1500 Grad Celsius verwendet. Die grössten Branchen in Bezug auf den Energieverbrauch sind die Chemie- und Pharmaindustrie (8 TWh), der Maschinenbau (6,7 TWh) und die Lebensmittel- und Tabakindustrie (5,8 TWh) (IEA 2022). Auf diese drei Teilsektoren zusammen entfallen 66% des Erdgasverbrauchs und 51% des Rohölverbrauchs der Industrie. Die Schweizer Industrie stösst jährlich rund 8,3 Mt CO₂-Äquivalenten aus (UNFCCC 2021). Trotz der prozessbedingten Emissionen aus der chemischen Umwandlung, vor allem in der Zement- und Chemieindustrie (2,1 Mt, 25%), leisten Erdgas und Erdöl einen erheblichen Beitrag zu den gesamten CO₂-Emissionen des Sektors (2,2 Mt / 27% aus Erdgas und 0,8 Mt / 9% aus Erdöl).

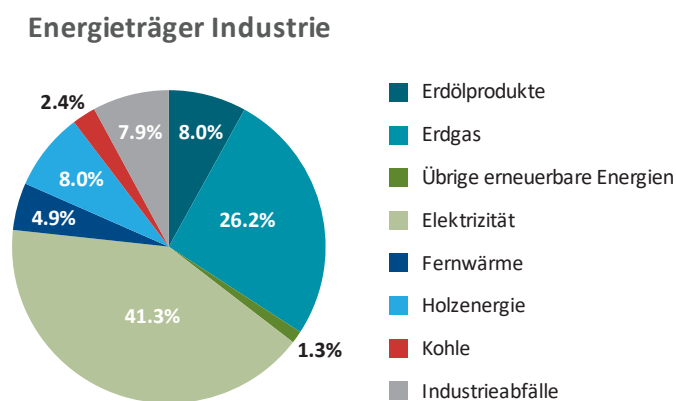


Abbildung 3. Prozentuale Verteilung der in der Schweizer Industrie eingesetzten Energieträger im Jahr 2020. Der Gesamtenergiebedarf des Industriesektors beträgt ~40 TWh. Angepasst aus BFE (2021b).

Um von fossilen Brennstoffen unabhängig zu werden und das Netto-Null-Ziel für Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, dass alle Sektoren ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern und auf erneuerbare Energiequellen umsteigen. Im Folgenden werden die Schritte erläutert, die dringend erforderlich sind, um die Grundlage für eine solche Energiewende zu schaffen. Diese Schritte müssen jetzt eingeleitet werden, damit kostspielige Investitionen in die Infrastruktur nachhaltig sind und verlorene Vermögenswerte so weit wie möglich vermieden werden können. Die Punkte 1-3 betreffen die Nachfrageseite: Haushalte und Gebäude, Verkehr und Industrie. Die Punkte 4-5 beziehen sich auf die Angebotsseite mit Schwerpunkt auf erneuerbaren Energien.

1. Senkung des Energiebedarfs von Gebäuden und schrittweiser Ausstieg aus fossilen Heizsystemen

Der Endenergiebedarf der Haushalte und Gebäude beträgt 61 TWh, wovon 16,5 TWh durch Erdölprodukte und 13,2 TWh durch Erdgas gedeckt werden (BFE 2021b). Diese werden hauptsächlich für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung verwendet.

Eine einfache und leichte Möglichkeit der schnellen Reduzierung besteht darin, die Thermostate für Raumheizung und Warmwasser abzusenken. Eine Absenkung der Temperatur für die

Raumheizung um nur 1 Grad Celsius reduziert den Erdgasbedarf um 6% (EnergieSchweiz 2022). Analog dazu reduziert eine Senkung der Warmwassertemperaturen in Gebäuden um 5 Grad Celsius den Erdgasverbrauch um 10%. Weitere einfache Massnahmen sind zum Beispiel das Lüften beheizter Räume für einige Minuten bei weit geöffneten Fenstern, anstatt diese für längere Zeit zu kippen, und bei Bedarf der Austausch von Haushaltsgeräten durch energieeffiziente Geräte.

Eine zeitaufwändigere Variante ist die Verbesserung der Isolierung bestehender Gebäude, wodurch der Energiebedarf und die Heizkosten gesenkt werden. Bei der derzeitigen jährlichen Renovierungsrate von 1 bis 2% werden jedoch viele der heutigen energieineffizienten Gebäude wahrscheinlich auch im Jahr 2050 und darüber hinaus noch ohne verbesserte Isolierung sein.

Politischer Handlungsbedarf – Renovierung von Gebäuden

Zu den Hauptgründen für die niedrige Sanierungsrate gehören das Problem geteilter Anreize für Vermieter und Mieter, hohe Vorlaufkosten für Investitionen in die Energieeffizienz und hohe Wertverluste für künftige Energieeinsparungen. Diesen Problemen müsste mit entsprechenden politischen Bedingungen und Anreizen begegnet werden. Für das Problem der geteilten Anreize wären zum Beispiel Gesetze nötig, mit denen die Heizkosten zwischen Vermietern und Mietern aufgeteilt werden.

Neben einer Verbesserung der energetischen Gebäudequalität ist auch der Ersatz von Öl- und Gasheizungen durch Alternativen wie Wärmepumpen (Luft- und Erdwärme), Holzheizungen (zum Beispiel Pellets) und Fernwärmesysteme (auf der Grundlage von Biomasse, Abfällen oder geothermischer Energie) ein weiterer notwendiger Schritt. Bei Neubauten sind Wärmepumpen im Allgemeinen kosteneffizient – über die gesamte Lebensdauer kosten sie weniger als fossile Systeme. Auch im Gebäudebestand sind sie häufig – wenn auch nicht immer – kosteneffizient (Cabeza et al. 2022). Besonders teuer dagegen wird es, wenn die vorhandenen Heizkörper für höhere Wassertemperaturen (zum Beispiel 50 Grad Celsius) ausgelegt sind, als Wärmepumpen effizient erreichen können.

Politischer Handlungsbedarf – Heizsysteme auf Basis erneuerbarer Energien

In mehreren Kantonen gibt es bereits Gesetze, die (bei Neubauten oder bei Sanierung im Bestand) den Einbau neuer fossiler Heizsysteme untersagen oder Anreize für den Ersatz bestehender fossiler Heizsysteme durch nicht-fossile Alternativen bieten. Auf nationaler Ebene bedarf es ähnlicher Gesetze, die den Ausstieg aus fossilen Heizsystemen vorschreiben, wie es die frühere Version des CO₂-Gesetzes des Bundes vorsah, die 2021 von den Stimmbürgerinnen und -bürgern abgelehnt wurde. Die Umfrageergebnisse (siehe letzter Abschnitt) zeigen, dass die Stimmbürgerinnen und Stimmbürger mittlerweile ein schweizweites Verbot neuer fossiler Heizungen ab 2025 befürworten würden. Eine weitere in Betracht zu ziehende nationale Strategie könnte den Austausch bestehender fossiler Heizungsanlagen ab einem bestimmten Alter (zum Beispiel 20 Jahre) vorschreiben.

In städtischen Gebieten, in denen Wärmepumpen oder andere alternative Heizsysteme möglicherweise nicht geeignet sind, kann Fernwärme eine Alternative sein. Fernwärme kann aus einer Reihe von Quellen gespeist werden, zum Beispiel aus Kehrlichtheizkraftwerken, grossen Wärmepumpen, geothermischer Energie oder industrieller Abwärme. Kehrlichtheizkraftwerke und

Wärmepumpen können ganzjährig betrieben werden, wenn sie mit grossen saisonalen Wärmespeichern gekoppelt sind und so zum Ausgleich eines saisonalen Missverhältnisses von Angebot und Nachfrage beitragen (Forum Energiespeicher Schweiz 2022) (siehe Punkt 5). Niedertemperatur-Wärmenetze können auch den potenziellen künftigen Kühlungsbedarf im städtischen Raum decken.

Politischer Handlungsbedarf – Fernwärme

Fernwärme ist für die Beheizung von Gebäudekomplexen und Stadtvierteln effizienter als einzelne Wärmepumpen für jedes Gebäude. Wo immer dies machbar erscheint, sind Anreize für den Ausbau von Fernwärmenetzen auf Basis erneuerbarer Energien gefragt.

2. Senkung der Energienachfrage und schrittweiser Ausstieg aus fossilen Energieträgern im Verkehr

Der Verkehrssektor stellt rund 33% des Endenergiebedarfs in der Schweiz (BFE 2021b) und ist damit der Sektor mit dem höchsten Energieverbrauch und der grössten Abhängigkeit von fossilen Energieträgern (>90%, siehe Abbildung 2). Hinzu kommt, dass rund 65% aller Fahrten in der Schweiz auf den motorisierten Individualverkehr entfallen (BFS 2015) und 60% der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen verursachen (BAFU 2022).

Optionen wie Homeoffice, Telekonferenzen, die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel sowie das Velofahren und falls möglich Zu-Fuss-Gehen können den Mobilitätsbedarf erheblich und unmittelbar senken (Bach et al. 2021). Die COVID-19-Pandemie hat gezeigt, dass Homeoffice und Telekonferenzen praktikabel sind, und viele Unternehmen und Einrichtungen bieten ihren Mitarbeitenden weiterhin diese Flexibilität.

Die drastische Verringerung der Abhängigkeit von aus dem Ausland importierten fossilen Brennstoffen erfordert die schrittweise Abschaffung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Das Europäische Parlament hat vor kurzem eine Reihe von Emissionsnormen verabschiedet, die bis 2035 auf 0 g CO₂ pro km sinken sollen; selbst wenn die Schweiz sich dafür entscheidet, vorerst keine entsprechenden eigenen Gesetze zu verabschieden, ist es unwahrscheinlich, dass weiterhin neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren für den Schweizer Markt verfügbar sind. Aus der Klimaperspektive zeigen Studien eindeutig, dass Elektrofahrzeuge, die mit erneuerbarer Energie geladen werden, allen anderen Kraftstoff- und Antriebsoptionen weit überlegen sind (Agora Verkehrswende 2019; Jaramillo et al. 2022).

In der Schweiz findet bereits eine Elektrifizierung in Form leichter Elektrofahrzeuge statt, wie der steigende Neuwagenabsatz zeigt. Im Jahr 2021 machen batterieelektrische und Plug-in-Hybridfahrzeuge zusammen bereits einen Anteil von 22% am Neuwagenmarkt aus – drei Jahre zuvor lag dieser noch bei knapp 4% (Auto-Schweiz 2022). Für eine Fortsetzung des aktuellen Trends ist die Bereitstellung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur ausschlaggebend, was im Allgemeinen schnell vorangeht.

Die Schweiz steht jedoch vor einer besonderen Herausforderung in Bezug auf die Ladeinfrastruktur für Privathaushalte und Wohngebäude, da sie eine der niedrigsten Eigentumsquoten an

privaten Garagenplätzen in Europa aufweist. Das heisst die meisten Fahrzeugbesitzer parkieren über Nacht auf einem Gemeinschaftsparkplatz (der in der Regel zum Wohngebäude gehört) oder auf der Strasse. Eine rasche Wende dürfte daher von kurzfristigen Lösungen für die Ladeinfrastruktur abhängen. Mit einem wachsenden Bestand an Elektrofahrzeugen könnte es sich in der Folge auch als notwendig erweisen, den Ladevorgang flexibler zu gestalten, insbesondere tagsüber, wenn viel Solarstrom verfügbar ist.

In vielen Fällen sind Elektrofahrzeuge auch für den Strassengüterverkehr bereits heute eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung, insbesondere angesichts der aktuellen Struktur der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) in der Schweiz (Noll et al. 2022).

Politischer Handlungsbedarf – Ende des Verbrennungsmotors

Die Ladeinfrastruktur muss in Wohngebieten, auf Firmenparkplätzen und entlang von Autobahnen ausgebaut werden. Um die Ladekapazitäten in den kommenden Jahren zu erhöhen, müssen die Städte verpflichtet werden, in Wohngebieten eine Ladeinfrastruktur für Parkplätze entlang der Strassen zu installieren. Darüber hinaus ist eine gesetzliche Regelung notwendig, damit Mieterinnen und Mieter auf Wohnparkplätzen und in Parkgaragen kurzfristig Ladesäulen nachrüsten können. Damit verbunden ist der Auftrag an Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer, die Verkabelung bei Bedarf aufzurüsten und gegebenenfalls ein Lastmanagementsystem zu installieren. Zusätzliche politische Massnahmen, die die Nachfrage ankurbeln, können die Umstellung weiter beschleunigen, wie zum Beispiel: ein schnellerer Übergang (zum Beispiel bis 2030 statt 2035) zu einem Null-Emissions-Standard, der den Verkauf neuer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren effektiv verbietet; finanzielle Förderung für den Einbau von Ladesäulen durch die Autokäuferinnen und Autokäufer; finanzielle Förderung wie Steuernachlässe oder zeitlich begrenzte Befreiungen von künftigen Strassennutzungsgebühren beim Kauf eines E-Fahrzeugs.

Um eine Dekarbonisierung des Strassengüterverkehrs zu ermöglichen, müssen mögliche künftige Änderungen der LSVA so gestaltet werden, dass der Übergang zur E-Mobilität nicht behindert wird.

Ein kleinerer Teil der fossilen Brennstoffe wird in anderen Verkehrssektoren und -arten wie dem Strassengüterverkehr und dem Flugverkehr eingesetzt (22,5 TWh Flugtreibstoffe in 2019 und 8,5 TWh in 2020) (BFE 2021c). Da diese Sektoren mit der heutigen Batterietechnologie schwieriger zu elektrifizieren sind, könnten Energieträger wie Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe eine wichtige Rolle spielen, weshalb die Schweiz in Zukunft auf den Import dieser Energieträger angewiesen sein könnte.

Politischer Handlungsbedarf – Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe

In den Verkehrssektoren, die nur schwer zu elektrifizieren sein werden, müssen die politischen Rahmenbedingungen den Übergang von fossilen Energieträgern zu wasserstoffbasierten oder synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen unterstützen. Dazu gehört auch der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur.

3. Ausstieg aus fossilen Energieträgern in der Industrie

Die Schweizer Industrie benötigt jährlich rund 10 TWh Erdgas, 3 TWh Rohölprodukte und 1 TWh Kohle (BFE 2021b). Die kurzfristige Reaktion der industriellen Nachfrage auf hohe Preise für fossile Brennstoffe ist sehr unelastisch. Es braucht Zeit, um komplexe Fertigungsprozesse und -verfahren anzupassen oder in energieeffizientere Anlagen zu investieren (Kober et al. 2020).

Es können langfristige Massnahmen ergriffen werden, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern, ohne die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu gefährden. Erstens sind energieeffizientere Produktionsprozesse häufig auch kosteneffizientere Optionen, die bereits in hohem Masse genutzt werden. Zweitens kann die Niedertemperatur-Prozesswärmeversorgung elektrifiziert werden. Hochtemperatur-Wärmepumpen sind eine vielversprechende Option für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme, wie sie in Industriesektoren wie der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie oder der Zellstoff- und Papierindustrie benötigt wird (Obrist et al. 2022). Auch die direkte Nutzung von Erdwärme ist eine interessante Option für industrielle Niedertemperaturprozesse, zumal diese in der Regel ganzjährig laufen. Um die Temperatur der geothermischen Quelle an die Anforderungen anzupassen, lässt sich das System auch um eine Wärmepumpe erweitern.

Für viele Hochtemperaturprozesse in der chemischen Industrie ist die Elektrifizierung nach wie vor eine Herausforderung, was bedeutet, dass grüner Wasserstoff, synthetische Brennstoffe oder Biokraftstoffe zum Einsatz kommen könnten. Biokraftstoffe sind jedoch nur begrenzt verfügbar, und synthetische Kraftstoffe sind derzeit kaum kosteneffizient. Grüner Wasserstoff kann in den meisten Anwendungsbereichen Erdgas ersetzen, erfordert jedoch einen Umbau der Produktionsanlagen, was mit hohen Investitionskosten verbunden ist und häufig die Umsetzung behindert. Alternativ könnte dem Erdgas zur Verbrauchsreduzierung Wasserstoff beigemischt werden, was den Vorteil hätte, dass die bestehende Infrastruktur weiter genutzt werden kann.

Bei industriellen Prozessen (zum Beispiel Zementwerken), die grosse Mengen CO₂ produzieren, dürfte die Erreichung der Klimaziele eine langfristige Speicherung dieses Treibhausgases erfordern. Der zusätzliche Platz-, Wärme- und Strombedarf für die Abscheidungsanlage und den anschliessenden Transport und die Lagerung muss berücksichtigt werden. Wann immer Biomasse als Primärenergiequelle genutzt wird, können negative Emissionen ermöglicht werden (siehe Punkt 6).

Politischer Handlungsbedarf – Industrie

Die grössten CO₂-Emittenten der Schweiz unterliegen bereits dem System der CO₂-Emissionszertifikate, und für die Nutzung fossiler Brennstoffe in der Industrie fällt eine CO₂-Abgabe an. Da jedoch die kurzfristige Nachfrage nach fossilen Brennstoffen in der Industrie sehr unelastisch ist, sind zusätzliche Massnahmen erforderlich. Die meisten dieser Optionen werden sich auf eine Kombination aus Fördermassnahmen (zum Beispiel Steuergutschriften oder Fördergelder), Regulierungsmassnahmen (zum Beispiel Emissionsnormen für bestimmte industrielle Anwendungen) oder Kohlenstoffmärkten und -preisen stützen. Darüber hinaus müssen die energiepolitischen Rahmenbedingungen kohlenstoffarme Alternativen wie grünen Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe fördern, damit ihre Kosten sinken, bis der technologische Fortschritt sie wettbewerbsfähig macht.

4. Beschleunigte Einführung erneuerbarer Energien und intelligenter Energiesysteme

Wenn so viele Sektoren und Anwendungen wie möglich elektrifiziert werden, muss der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen steigen. Erneuerbare Energien (Sonnen- und Windenergie, Bioenergie und Erdwärme) müssen schneller bereitgestellt und neue Technologien zu deren Umwandlung entwickelt werden, damit genügend erneuerbare Elektrizität und/oder Wärme bereitsteht, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Gleichzeitig trägt die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien dazu bei, dass die Schweiz bis 2050 klimaneutral wird, woraus sich eine Win-Win-Strategie ergibt.

Politischer Handlungsbedarf – erneuerbare Energie

Zu den politischen Massnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien und der Entwicklung der Lieferkette gehören zum Beispiel finanzielle Unterstützung zur Verbesserung oder Entwicklung neuer Technologien für erneuerbare Energien, zinsgünstige Finanzierungen für die Entwicklung der Lieferkette und der Infrastruktur, eine Straffung der behördlichen Genehmigungsverfahren, die Lockerung von Landnutzungsbeschränkungen (zum Beispiel für bodengestützte Solarenergie) sowie eine verlässliche Finanzierung neuer Projekte (zum Beispiel über Einspeisetarife, Stromabnahmeverträge). Dies kann dazu beitragen, Investitionen in die Lieferketten und die Versorgung mit erneuerbarer Energie zu beschleunigen.

Intelligente Energiesysteme können als Katalysator für eine effiziente Integration der erneuerbaren Energien dienen. Im grossen Massstab bedeutet dies eine Digitalisierung und Automatisierung des gesamten Stromsystems, um eine feinkörnige Überwachung des Systems und die automatische Aktivierung flexibler Ressourcen zu ermöglichen. Dazu sind flächendeckende Messungen auf der Verbraucher- und Systemebene (zum Beispiel in Umspannwerken) mit intelligenten Zählern einschliesslich der erforderlichen Kommunikation zur Echtzeitüberwachung von Verteilungssystemen und Algorithmen für die intelligente Aktivierung verfügbarer Ressourcen erforderlich. Die Automatisierung muss sich bis zum Endverbraucher durchziehen, das heisst für das Laden eines E-Fahrzeugs muss es automatisierte Anreize geben, um die Netzkapazitäten optimal zu nutzen. Durch die optimale Nutzung der Ressourcen kann das Netz näher an der maximalen Auslastung betrieben werden. Dadurch wird der Bedarf an Reserven (zum Beispiel Wasserkraft oder

Erdgas) verringert und die Effizienz des Gesamtsystems erhöht. Ferner können vorhandene brachliegende Systemressourcen eingebunden werden, zum Beispiel verfügbare Wechselrichter über ein hohes Mass an Regelbarkeit, was derzeit nicht im möglichen Umfang genutzt wird. Mit einer intelligenten Steuerung können diese Wechselrichter kurzfristige Reserven aus erneuerbaren Energien bereitstellen und tägliche Schwankungen ausgleichen. Auch Datentechnik kann über Lernalgorithmen helfen, die (standortspezifische) Erzeugung aus erneuerbaren Energien zuverlässiger vorherzusagen und so die erforderlichen Reserven weiter zu reduzieren.

Politischer Handlungsbedarf – intelligente Energiesysteme

Politische Massnahmen zur Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien müssen auch die Digitalisierung und Automatisierung des Stromnetzes einschliessen. Damit wird eine optimale Einbindung der erneuerbaren Energien gewährleistet, die für die Elektrifizierung von Gebäuden, Verkehr und Industrie dringend erforderlich ist.

5. Sichere Stromversorgung

Eine Schweiz spezifische Herausforderung ist die mögliche Stromknappheit im Winter. Hierfür gibt es zwei Hauptgründe. Erstens liefert die Windenergie in der Schweiz aufgrund der topografischen Gegebenheiten in der Regel weniger Ausbeute als in anderen Ländern und ist damit relativ unwirtschaftlich. Neben den behördlichen Hürden zur Genehmigung neuer Windkraftanlagen hat dies zur Folge, dass in der Schweiz extrem wenige Windturbinen gebaut werden und übers Jahr gesehen mehr Energie aus Photovoltaik (PV) als aus Windkraft gewonnen wird. Zweitens ist die Schweiz nicht Teil der Europäischen Union (EU), was bedeutet, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen für eine koordinierte Stromnetzplanung und den Zugang zu Übertragungskapazitäten zum Ausgleich saisonaler Schwankungen in der Schweiz weniger sicher sind als im übrigen Europa.

Die Zuverlässigkeit der Stromversorgung – im Sinne einer Gewährleistung der Systemzuverlässigkeit zu Kosten, die die Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Wirtschaft gewährleisten – kann durch internationale Abkommen erhöht werden, die eine sichere Rechtsgrundlage für die weitere Integration des Schweizer Stromnetzes in das europäische System schaffen. So könnte im Sommer nach wie vor mehr Strom exportiert und im Winter importiert werden, was der Schwäche der Schweiz im Bereich Windenergie im Vergleich zu Photovoltaik und Wasserkraft entgegenwirken würde.

Sollte es diplomatisch nicht möglich oder nicht erwünscht sein, das schweizerische Windkraftdefizit durch internationale Zusammenarbeit zu beheben, müssten kostspieligere Massnahmen ergriffen werden, um die inländische Energieproduktion in den Wintermonaten zu erhöhen. Eine aktuelle Studie zeigt, dass die Stromversorgungskosten in der Schweiz in Szenarien, in denen der internationale Handel stark eingeschränkt und im Extremfall ganz unterbunden wäre, im Vergleich zu einem Szenario uneingeschränkter Handelsmöglichkeiten um 50 bis 175% steigen würden (Tröndle et al. 2020).

Politischer Handlungsbedarf – internationale Zusammenarbeit

Die Politik könnte die Stromversorgungssicherheit der Schweiz am besten dadurch steigern, dass sie eine dauerhaft sichere Rechtsgrundlage für den Stromhandel schafft, mit der das Land von seinem relativen Überschuss an grünem Strom in den Sommermonaten und der relativen Knappheit in den Wintermonaten profitieren würde. Zu den Optionen zählen ein bilaterales Abkommen mit der EU, das eine Beteiligung der Schweiz am EU-Strommarkt sicherstellen würde, oder Vereinbarungen mit Nachbarländern und -regionen, die eine ausreichende Übertragungskapazität bis zur Schweizer Grenze gewährleisten.

Insbesondere in Ermangelung einer sicheren Rechtsgrundlage für die Einfuhr von Strom im Winter ist es unerlässlich, die inländische Stromerzeugung im Winter auszubauen. Hierfür bieten sich die Planung von Wasserkraftreserven für die Wintermonate und/oder Investitionen in Gaskraftwerke, Photovoltaik an strategischen Standorten oder geothermische Energie an. Der Betrieb von Gaskraftwerken ist unter dem Gesichtspunkt einer fossilenergiefreien und treibhausgasneutralen Energieversorgung nur dann sinnvoll, wenn sie mit synthetischem Gas oder Biogas betrieben werden und über eine Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) verfügen. Das Potenzial der Biogaserzeugung ist in der Schweiz jedoch begrenzt, und die Erzeugung von marktfähigem synthetischem Gas erfordert eine grosse Menge an Strom, der das ganze Jahr über zu niedrigen Kosten verfügbar sein muss. Darüber hinaus verfügt die Schweiz nur über begrenzte Kapazitäten, um synthetisches Gas zwischenzulagern (siehe Einleitung) oder CO₂ dauerhaft oder vorübergehend abzuscheiden, um es anschliessend im Ausland zu lagern (siehe Punkt 6). Daher werden solche Gase wahrscheinlich hauptsächlich in den Nachbarländern gelagert werden müssen. Dazu sind sorgfältige Analysen möglicher CO₂-Transport und -Speicheroptionen notwendig (Ogland-Hand et al. 2022). Wie beim Strom müsste auch hier eine sichere Rechtsgrundlage geschaffen werden, damit die Schweiz im Bedarfsfall Gas aus den Nachbarländern importieren kann.

PV-Anlagen in alpinen Regionen könnten eine wichtige Option sein, da sie im Winterhalbjahr deutlich mehr Strom erzeugen als klassische Aufdachanlagen im städtischen Raum (Anderegg, Strebel, and Rohrer 2020). Neueste Schätzungen kommen zu dem Schluss, dass die technisch realisierbare Fläche für alpine Photovoltaik fast 150 km² beträgt, weniger als 0,4% der geografischen Fläche der Schweiz (Dujardin, Kahl, and Lehning 2021). Die Abdeckung dieser Fläche mit winteroptimierten PV-Paneelen könnte jährlich mehr als 40 TWh Strom produzieren (Egli et al. 2022). Derzeit wird ein gross angelegtes alpines PV-Pilotprojekt in Grenchols (Wallis) mit 5 km² bifazialen PV-Paneelen diskutiert, die 2 TWh elektrische Energie pro Jahr erzeugen würden (Hardegger 2022). In jedem Fall sollten parallel hierzu Photovoltaikanlagen auf bestehenden Bauwerken (zum Beispiel Gebäuden, Staudammwänden und Lärmschutzwänden entlang von Eisenbahnen und Autobahnen) errichtet werden. Das geschätzte PV-Potenzial für Dachflächen liegt zwischen 20 und 50 TWh (Moro et al. 2021), und schwimmende Photovoltaikanlagen auf alpinen Stauseen (zum Beispiel Lac des Toules (ABB 2020)) könnten an geeigneten Stellen ebenfalls ihren Beitrag leisten.

Die geothermische Stromerzeugung funktioniert im Prinzip das ganze Jahr über und ist sogar im Winter wesentlich effizienter. Sie kann bei Bedarf hochgefahren werden und so zum Beispiel im Winter oder in Zeiten, in denen wenig bis gar keine Energie durch Wind- und Solarkraft erzeugt werden kann (Dunkelflaute), Strom liefern, ohne dass dabei (viel) CO₂ ausgestossen wird.

Allerdings erfordert die Geothermie zur Stromerzeugung wesentlich höhere Untergrundtemperaturen als bei reiner Wärmenutzung (zum Beispiel für Fernwärme, siehe Punkt 1). Das Potenzial geeigneter Standorte mit ausreichender Durchlässigkeit des Untergrunds in der Tiefe und ausreichend hohen Temperaturen ist für die Schweiz derzeit noch weitgehend unbekannt.

Politischer Handlungsbedarf – Stromerzeugung im Winter

Die Politik muss Pilotprojekte in der alpinen Photovoltaik fördern, damit aus verschiedenen Projekten und den je nach Standort sehr unterschiedlichen Bedingungen wichtige Lehren gezogen werden können. Auf der technisch-wirtschaftlichen Seite bleiben offene Fragen zu Wartungskosten und Naturgefahren wie Lawinen und Murenabgängen in grossen Höhen.

Um das Potenzial der geothermischen Stromerzeugung im tiefen Untergrund zu beurteilen, müssen landesweite Felduntersuchungen und Pilotversuche auf Kantonsebene ermöglicht werden. Daher müssen die Vorschriften bezüglich des Untergrunds gestrafft und idealerweise auf Bundesebene vereinheitlicht werden.

Eine Alternative zur Erzeugung von mehr Strom in den Wintermonaten ist die Senkung des Stromverbrauchs in dieser Jahreszeit. Dies könnte über gross angelegte, über- oder unterirdische thermische Energiespeichersysteme geschehen, die gegebenenfalls, aber nicht notwendigerweise mit Wärmepumpen in Fernwärmesystemen gekoppelt sind. Bei richtiger Dimensionierung können Wärmepumpen das ganze Jahr über betrieben werden und im Sommer die erhöhte PV-Stromerzeugung nutzen. Im Winter wird ein Teil des Wärmebedarfs aus dem thermischen Speicher gedeckt, wodurch der Strombedarf effektiv reduziert wird. Thermische Speicher können sich auch in Verbindung mit Kehrlichtheizkraftwerken oder durch die Regeneration von Bohrfeldern positiv auf den Winterstrombedarf auswirken (Forum Energiespeicher Schweiz 2022).

Politischer Handlungsbedarf – thermische Energiespeicher

Die Schweiz braucht eine koordinierte Raumplanung für Energieinfrastrukturen, einschliesslich grosser saisonaler thermischer Energiespeicher. Konkrete Projekte müssen entwickelt und demonstriert werden. Erkenntnisse aus dem praktischen Betrieb müssen in der Branche Verbreitung finden, um eine breitere Anwendung zu fördern.

6. Negativemissionstechnologien

Trotz aller oben genannter Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz, zur Verringerung des Einsatzes fossiler Brennstoffe und damit zur Senkung des Treibhausgasausstosses lassen sich Emissionen nicht überall komplett vermeiden. Dies gilt insbesondere für industrielle Hochtemperaturverfahren sowie den Warentransport und die Luftfahrt. Diese schwer vermeidbaren Emissionen werden sich im Jahr 2050 auf 12 Mt belaufen (BFE 2020). Daher werden Negativemissionstechnologien (NET) notwendig sein, das sind biologische und technische Verfahren, die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und dauerhaft speichern. Technische Ansätze bestehen darin, CO₂ aus konzentrierten Punktquellen (zum Beispiel in Zementwerken oder Kehrlichtheizkraftwerken) aufzufangen, über ein nationales Pipelinennetz zu sammeln und zu unterirdischen Endlagern (CCS) zu transportieren, die sich wahrscheinlich überwiegend im Ausland befinden werden. Dies erfordert den Anschluss an ein europäisches Pipelinennetz, damit das CO₂ zu geeigneten Lagerstätten (z.B. entleerten Öl- und Gasfeldern unter der Nordsee, Projekt «Northern Lights»), transportiert

werden kann. Es gibt noch weitere Negativemissionstechnologien, die erforscht und angewandt werden müssen (BFE 2021a), wie zum Beispiel die direkte Luftabscheidung (DAC), die auch als Kohlenstoffquelle zur Herstellung synthetischer Brennstoffe dienen kann.

Politischer Handlungsbedarf – Negativemissionstechnologien

Das Netto-Null-Klimaziel setzt voraus, dass auch schwer oder nicht zu vermeidende Emissionen angegangen werden. Die realistischste weitreichende Option wäre eine Speicherung von CO₂, das aus punktuellen Quellen wie Kehrlichtverbrennungs- oder Zementanlagen abgeschieden wurde, im tiefen Untergrund. Dafür müssen die Möglichkeiten der unterirdischen CO₂-Speicherung untersucht und ein CO₂-Leitungsnetz in der Schweiz und im benachbarten Ausland aufgebaut werden, um das gesamte abgeschiedene CO₂ zu transportieren und dauerhaft unterirdisch zu speichern. Dies erfordert entsprechende Vorschriften zur Planung und Genehmigung geologischer Standorte zur CO₂-Speicherung, entsprechende Leitungen sowie eine starke internationale Zusammenarbeit auf europäischer Ebene.

Die öffentliche Akzeptanz ist hoch

In der letzten Aprilwoche 2022 haben wir eine Umfrage unter Schweizer Stimmberechtigten durchgeführt – 600 in deutschsprachigen Kantonen und 400 in französischsprachigen Kantonen –, um zu untersuchen, wie hoch die öffentliche Akzeptanz für jede der oben beschriebenen politischen Massnahmen ist und ob sich die Akzeptanz als Folge des Krieges in der Ukraine verändert hat (Patt and Steffen 2022). Wie Abbildung 4 zeigt, ist die Akzeptanz im Allgemeinen hoch: Die Mehrheit der Befragten befürwortet acht der zehn politischen Vorschläge, die wir den Teilnehmern der Umfrage zur Prüfung vorgelegt haben. Der politische Vorschlag mit der schwächsten Zustimmungsrate – der aber immer noch mehrheitlich befürwortet würde – wäre das Verbot des Verkaufs von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2030, fünf Jahre früher als die EU derzeit plant. Zwei der politischen Vorschläge, die wir den Befragten unterbreitet haben – der Bau neuer Gaskraftwerke und die Stärkung der Stromhandelsbeziehungen mit den Nachbarländern – betreffen dasselbe Problem der saisonalen Unausgewogenheit der Energieerzeugung mit erneuerbaren Energien in der Schweiz. Hierbei sprachen sich die Befragten stärker für eine Lösung über den Stromhandel als für neue Gasanlagen aus.

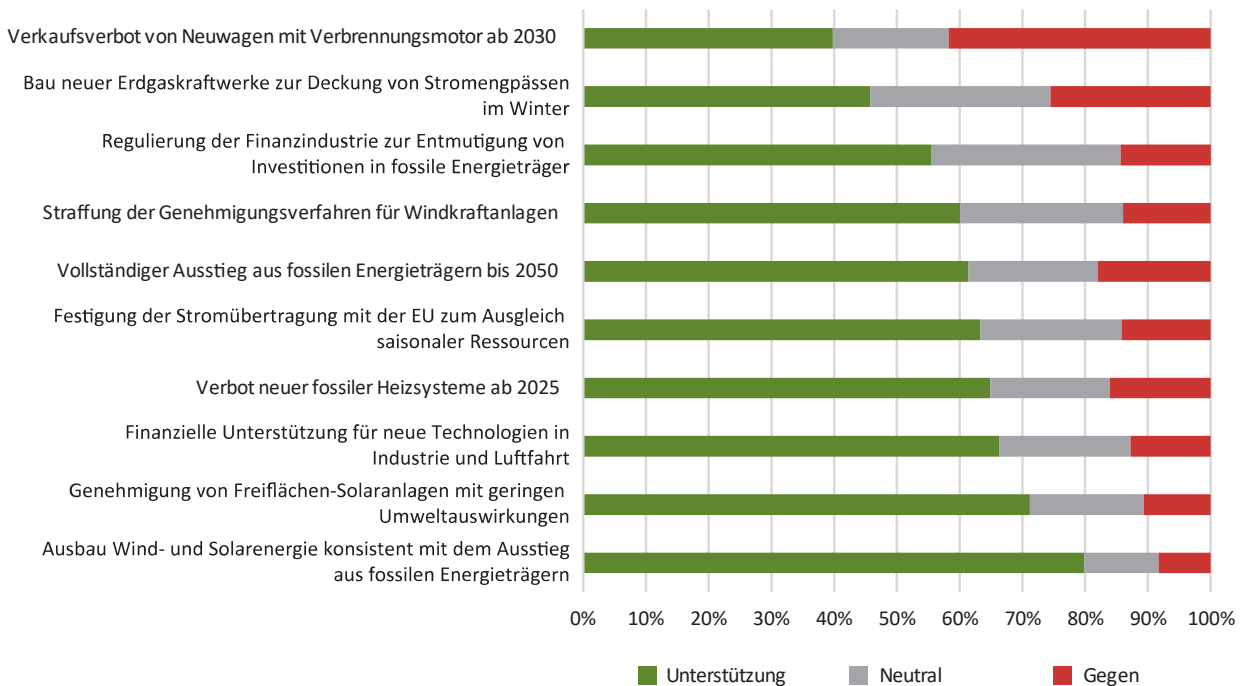


Abbildung 4: Unterstützung für politische Vorschläge. Angepasst aus (Patt and Steffen 2022).

In fast allen Fällen war eine deutlich höhere Zustimmung als Folge des Kriegs in der Ukraine zu verzeichnen, und zwar über alle politischen Parteien hinweg, wobei mindestens doppelt so viele Personen angaben, dass ihre Zustimmungsrates eher zu- als abgenommen hat. Die einzige Ausnahme war die Errichtung neuer Gaskraftwerke, wo die Zustimmung bei Unterstützerinnen und Unterstützern konservativer Parteien leicht angestiegen ist, während sie bei den beiden grünen Parteien leicht rückläufig war.

Bei fast allen Fragen haben wir festgestellt, dass die Parteipräferenzen in hohem Masse mit der Zustimmung korrelieren. Abbildung 5 zeigt eine Momentaufnahme dieser Korrelationen, die den Grad der Zustimmung in Abhängigkeit von den Parteipräferenzen für drei der politischen Vorschläge angibt: Ausstieg aus fossilen Energieträgern bis 2050, Ausbau der heimischen Wind- und Solarenergieproduktion als Ersatz für fossile Energie und Ausbau der Stromübertragungsverbindungen zu Nachbarländern zur Steuerung der saisonalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

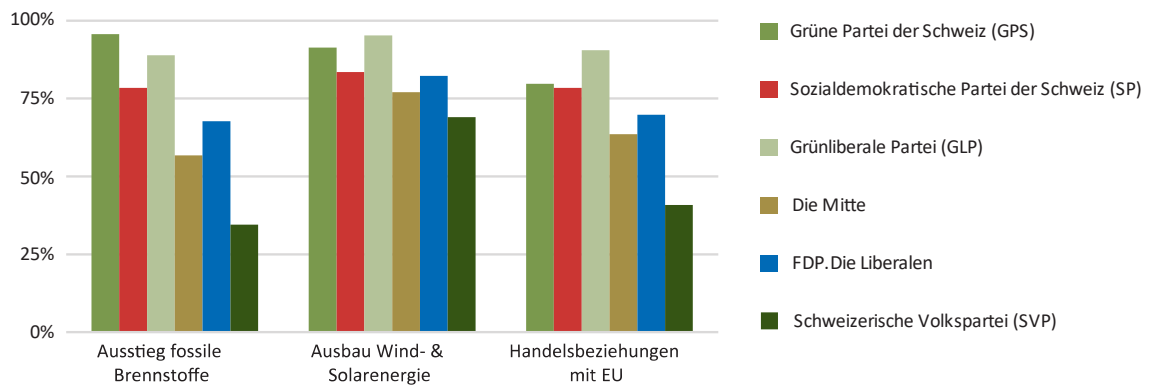


Abbildung 5: Anteil der Befragten, die drei beispielhafte politische Strategien unterstützen, nach Parteipräferenz. Angepasst aus (Patt and Steffen 2022).

Referenzen

- ABB. 2020. "Solarstrom Aus Dem Stausee Lac Des Toules." Retrieved May 25, 2022 (<https://new.abb.com/news/de/detail/61603/solarstrom-aus-dem-stausee-lac-des-toules>).
- Agora Verkehrswende. 2019. *Klimabilanz von Strombasierten Antrieben Und Kraftstoffen*.
- Anderegg, Dionis, Sven Strebel, and Jürg Rohrer. 2020. *Photovoltaik Versuchsanlage Davos Totalp Messergebnisse Winterhalbjahr 2019/2020*.
- Auto-Schweiz. 2022. "Immatrikulationen von Neuen Personenwagen (CH & FL)."
- Bach, Christian, Christian Bauer, Konstantinos Boulouchos, Dominik Bucher, Davide Cerruti, Amin Dehdarian, Massimo Filippini, Maximilian Held, Stefan Hirschberg, Ramachandran Kannan, Tom Kober, Albert Mancera Sugrañes, Valerio De Martinis, Véronique Michaud, Kirsten Oswald, Martin Raubal, Kyle Seymour, and Andrea Vezzini. 2021. "Pathways to a Net Zero CO₂ Swiss Mobility System."
- BP. 2021. *Statistical Review of World Energy*.
- Bundesamt für Energie (BFE). 2020. *Energieperspektiven 2050+: Kurzbericht*. Bern.
- Bundesamt für Energie (BFE). 2021a. *Energieperspektiven 2050+ Exkurs - Negativemissionstechnologien Und CCS - Potenziale, Kosten Und Einsatz*.
- Bundesamt für Energie (BFE). 2021b. "Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2020 Statistique Globale Suisse de l'Énergie 2020."
- Bundesamt für Energie (BFE). 2021c. *Überblick Über Den Energieverbrauch Der Schweiz Im Jahr 2020*.
- Bundesamt für Statistik (BFS). 2015. "Verkehrsverhalten der Bevölkerung." Retrieved May 10, 2022 (<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/verkehrsverhalten.html>).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). 2022. "Treibhausgasemissionen der Schweiz 1990-2020."
- Cabeza, L. F., Q. Bai, P. Bertoldi, J. M. Kihila, A. F. P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, and Y. Saheb. 2022. "Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." edited by J. M. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Dujardin, Jérôme, Annelen Kahl, and Michael Lehning. 2021. "Synergistic Optimization of Renewable Energy Installations through Evolution Strategy." *Environmental Research Letters* 16(6):064016. doi: 10.1088/1748-9326/ABFC75.
- Egli, Florian, Léonore Hälg, Markus Schreiber, and Marius Schwarz. 2022. *Alpenstrom Jetzt!*

EnergieSchweiz. 2022. "Energieeffizient Und Erneuerbar Heizen." Retrieved June 17, 2022 (<https://www.energieschweiz.ch/haushalt/heizen/>).

energy-charts. 2022. "Jährliche Gesamte Stromerzeugung in Der Schweiz 2021." Retrieved (https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=CH&interval=year&year=2021).

Forum Energiespeicher Schweiz. 2022. *Winterstrombedarf Und Saisonale Wärmespeicher – Mit Sommerwärme Strom Im Winter Sparen.*

Fuchs, Alexander, Turhan Demiray, Evangelos Panos, Ramachandran Kannan, Tom Kober, Christian Bauer, Warren Schenler, Peter Burgherr, and Stefan Hirschberg. 2017. *ISCHESS – Integration of Stochastic Renewables in the Swiss Electricity Supply System.*

Garrison, Jared, Blazhe Gjorgiev, Xuejiao Han, Renger van Niewkoop, Elena Raycheva, Marius Schwarz, Xuqian Yan, Turhan Demiray, Gabriela Hug, and Christian Schaffner. 2020. *Nexus-e: Scenario Results Report.*

Gaznat SA. 2020. "Natural Gas - Supply." Retrieved May 18, 2022 (<https://www.gaznat.ch/en-39-supply.html>).

Hardegger, Angelika. 2022. "Peter Bodenmann Great Again." *Neue Zürcher Zeitung.*

International Energy Agency (IEA). 2022. "IEA World Energy Statistics and Balances." Retrieved May 20, 2022 (<https://doi.org/10.1787/enestats-data-en>).

Jaramillo, P., S. Kahn Ribeiro, P. Newman, S. Dhar, O. E. Diemuodeke, T. Kajino, D. S. Lee, S. B. Nugroho, X. Ou, A. Hammer Strømman, and J. Whitehead. 2022. "Transport. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." edited by J. M. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Kannan, Ramachandran, Evangelos Panos, Stefan Hirschberg, | Tom Kober, and S. Bev. 2022. "A Net-Zero Swiss Energy System by 2050: Technological and Policy Options for the Transition of the Transportation Sector." *Futures & Foresight Science.* doi: 10.1002/FFO2.126.

Kober, Tom, Kannan Ramachandran, Michel Dominik Obrist, Evangelos Panos, Sophie Heald, Lucy Clements, Mary Goldman, and Hector Pollitt. 2020. *Swiss Industry: Price Elasticities and Demand Developments for Electricity and Gas (SWIDEM).*

Landis, Florian, Adriana Marcucci, Sebastian Rausch, Ramachandran Kannan, and Lucas Bretschger. 2019. "Multi-Model Comparison of Swiss Decarbonization Scenarios." *Swiss Journal of Economics and Statistics* 155(1):1–18. doi: 10.1186/S41937-019-0040-8/FIGURES/10.

Moro, Niccolò, David Sauter, Sven Strebel, and Jürg Rohrer. 2021. "Das Schweizer Solarstrompotenzial Auf Dächern." doi: 10.21256/ZHAW-2652.

- Noll, Bessie, Santiago del Val, Tobias S. Schmidt, and Bjarne Steffen. 2022. "Analyzing the Competitiveness of Low-Carbon Drive-Technologies in Road-Freight: A Total Cost of Ownership Analysis in Europe." *Applied Energy* 306:118079. doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118079.
- Obrist, Michel D., Ramachandran Kannan, Thomas J. Schmidt, and Tom Kober. 2022. "Long-Term Energy Efficiency and Decarbonization Trajectories for the Swiss Pulp and Paper Industry." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 52:101937. doi: 10.1016/J.SETA.2021.101937.
- Ogland-Hand, Jonathan D., Stuart M. Cohen, Ryan M. Kammer, Kevin M. Ellett, Martin O. Saar, Jeffrey A. Bennett, and Richard S. Middleton. 2022. "The Importance of Modeling Carbon Dioxide Transportation and Geologic Storage in Energy System Planning Tools." *Frontiers in Energy Research* 10:855105. doi: 10.3389/FENRG.2022.855105.
- Patt, Anthony, and Bjarne Steffen. 2022. *A Historical Turning Point? Early Evidence on How the Russia-Ukraine War Changes Public Support for Clean Energy Policies*. Working Paper. (<https://esc.ethz.ch/expert-groups/security-of-supply.html>).
- Schweizer Bundesrat. 2019. "Bundesrat will bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz." Retrieved March 10, 2022 (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/mitteilungen.msg-id-76206.html>).
- Schweizer Bundesrat. 2021. "Langfristige Klimastrategie der Schweiz." Retrieved March 10, 2022 (<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/65874.pdf>).
- Schweizer Bundesrat. 2022. "Versorgungssicherheit: Bundesrat Richtet Ab Dem Nächsten Winter Eine Wasserkraftreserve Ein Und Plant Reserve-Kraftwerke." Retrieved (<https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-87202.html>).
- Tröndle, Tim, Johan Lilliestam, Stefano Marelli, and Stefan Pfenninger. 2020. "Trade-Offs between Geographic Scale, Cost, and Infrastructure Requirements for Fully Renewable Electricity in Europe." *Joule* 4(9):1929–48. doi: 10.1016/J.JOULE.2020.07.018.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2021. *Switzerland. 2021 National Inventory Report (NIR)*.

Expertengruppen

Die Expertengruppen sind eine Initiative des Energy Science Center der ETH Zürich, um aktuelle Themen im Energiesektor aufzugreifen und Forschungserkenntnisse für Akteure ausserhalb des akademischen Bereichs zu konsolidieren. Ziel ist es, praktische, umsetzbare und wertschöpfende Empfehlungen für die Integration von Wissen und Know-how in verschiedene Sektoren zu geben, um die Energiewende voranzubringen. Die Expertengruppen führen selbst keine Forschungsarbeiten durch, sondern sammeln wissenschaftlich belegte Erkenntnisse und leiten daraus Schlussfolgerungen ab. Die Themen werden aus technischer, politischer, wirtschaftlicher (Märkte und Finanzen) und regulatorischer Sicht behandelt. Expertengruppen, die sich mit bestimmten Themen befassen, werden bei Bedarf je nach den Entwicklungen im Energiesektor und in der Politik einberufen.

Versorgungssicherheit

Die Expertengruppe Versorgungssicherheit befasst sich mit Themen, die das gesamte Energiesystem einschliesslich Stromnetz, Energiespeicherung und Sektorkopplung betreffen. Sie setzt sich aus Experten zusammen, die die Bereiche Maschinenbau und Elektrotechnik sowie Klimafinanzierung und -Politik vertreten.

Autorinnen und Autoren dieses Positionspapiers

- Prof. Dr. Gabriela Hug, Power Systems
- Dr. Turhan Demiray, Research Center for Energy Networks (FEN)
- Dr. Gianfranco Guidati, Energy Science Center (ESC)
- Prof. Dr. Russell McKenna, Energy Systems Analysis
- Dr. Kirsten Oswald, Energy Science Center (ESC)
- Prof. Dr. Anthony Patt, Climate Policy
- Prof. Dr. Martin Saar, Geothermal Energy and Geofluids
- Prof. Dr. Giovanni Sansavini, Reliability and Risk Engineering
- Dr. Christian Schaffner, Energy Science Center (ESC)
- Dr. Marius Schwarz, Energy Science Center (ESC)
- Prof. Dr. Bjarne Steffen, Climate Finance and Policy

Koordinatorin und Editorin

- Dr. Kirsten Oswald, Energy Science Center (ESC)

Weitere Information: <https://esc.ethz.ch/expert-groups.html>

Contact

Energy Science Center (ESC)

ETH Zürich

Sonneggstrasse 28

8006 Zürich

info@esc.ethz.ch

www.esc.ethz.ch