White Paper

Rolle und Potenzial von Wasserstoff in der Schweiz

Bild mit KI generiert

The Power of Energy

«Wasserstoff muss noch einige Hürden überwinden, doch Axpo ist vom Potenzial des grünen Wasserstoffs als sauberem, erneuerbarem und vielseitigem Energieträger überzeugt. Wir engagieren uns aktiv für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in der Schweiz und im europäischen Ausland und stehen kurz davor, die erste eigene Wasserstoff-Produktionsanlage in Betrieb zu nehmen.»

Christoph Brand
Chief Executive Officer

Rolle von grünem Wasserstoff für die Energiewende in der Schweiz

Wasserstoff spielt bei der Dekarbonisierung eine zentrale Rolle. Mit unserem White Paper erkunden wir das Potenzial von grünem Wasserstoff als sauberem, erneuerbarem und vielseitigem Energieträger. Axpo engagiert sich aktiv für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in der Schweiz und steht kurz davor, mit der ersten eigenen Wasserstoff-Produktionsanlage beim Wasserkraftwerk Reichenau in Domat/Ems die ersten Tonnen Wasserstoff zu erzeugen.

Darüber hinaus planen wir die Errichtung weiterer Anlagen in der Schweiz sowie gezielte Investitionen in Produktionsanlagen für grünen Wasserstoff und seine Derivate im Ausland. In diesem Bericht fassen wir unsere wichtigsten Erkenntnisse zusammen, ergänzt durch eine datenbasierte Analyse wichtiger Produktionskennzahlen und eine Bewertung des Potenzials für die Verwendung von reinem grünem Wasserstoff in der Schweiz.

Management Summary

Wasserstoff als flexibler Energieträger und Treibstoff der Zukunft

- Grüner Wasserstoff, der aus erneuerbarer Energie hergestellt wird, spielt eine entscheidende Rolle in unseren Bemühungen zur Reduzierung der CO_2-Emissionen. Die Energiewende bietet für Wasserstoff grosse Chancen, insbesondere in Sektoren, die schwer elektrifizierbar sind, wie die Industrie mit Hochtemperaturprozessen und energieintensive Mobilität mit der Anforderung hoher Energiedichte.

- Mit dem Einsatz von grünem Wasserstoff und seinen Derivaten ergeben sich langfristige und kompakte Energiespeichermöglichkeiten, die im Schwerlast-, Schiff- und Luftverkehr – eventuell über E-Fuels – Anwendungspotenzial bieten. Zudem können Wasserstoff und seine Folgeprodukte als Speichermedien für erneuerbare Energiequellen die saisonale und ortsunabhängige Energiespeicherung ermöglichen.

- Die Umwandlung von kosteneffizient produziertem Strom zu Wasserstoff könnte künftig einen Beitrag zur sicheren und zuverlässigen Energieversorgung über das ganze Jahr hinweg leisten. Die Stromgewinnung aus Wasserstoff ist wegen des heutigen Wirkungsgrads der Wasserstoffproduktion noch nicht wirtschaftlich und es ist davon auszugehen, dass die Anwendung zur Gewinnung von Strom in der Schweiz vorerst begrenzt bleibt. Ob die Rückverstromung wirtschaftlich ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab: Die Grundvoraussetzungen sind förderliche wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen sowie technologische Entwicklungen. Letztere werden intensiv erforscht.

- Die Schaffung einer Infrastruktur für den Transport von Wasserstoff erfordert erhebliche Investitionen in der Schweiz und in Europa. Die Koordination mit bestehenden Gasinfrastrukturen ist von entscheidender Bedeutung und es gilt, den Rückbau respektive eine Umnutzung der bestehenden Gastransportinfrastruktur genau zu analysieren sowie technisch und zeitlich mit dem Aufbau der Infrastruktur für den Wasserstofftransport abzustimmen. Axpo begrüsst folglich die jüngsten Entwicklungen[1], in deren Zusammenhang mit der Transitgas AG auch eine Schweizer Vertreterin Mitglied der Initiative European Hydrogen Backbone wurde.

- Ein optimierter Einsatz von Elektrolyseuren ist bei der Produktion von Wasserstoff entscheidend. Bei niedriger Auslastung fallen hohe Fixkosten ins Gewicht, während bei hoher Auslastung die Stromkosten dominieren. In unseren Analysen im Kapitel 2 ergibt sich ein theoretisches Optimum ab einer Auslastung von etwa 85%, mit Gestehungskosten bei der Wasserstoffproduktion im Bereich von CHF 8 –14 / kg H_2 bei Strompreisen von CHF 50 –125 / Megawattstunde (MWh).

- Wasserstoff wird eine wichtige Rolle in der künftigen Energie- und Mobilitätslandschaft spielen. Sein Beitrag zur Energiewende bleibt noch abzuwarten. Langfristige Modelle prognostizieren einen jährlichen Bedarf von etwa 125 000 Tonnen reinem Wasserstoff in der Schweiz im Jahr 2050, aufgeteilt auf inländische Produktion und Importe. Wenn dieser Bedarf rein mit grünem, einheimisch produziertem Wasserstoff gedeckt werden soll, erfordert dies eine erhebliche Elektrizitätsmenge von etwa 7.5 Terawattstunden (TWh). Der Energieaufwand für die Herstellung von Wasserstoffderivaten wie synthetischem Methan ist dabei nicht berücksichtigt und würde zusätzlich eine deutlich grössere Energiemenge erfordern.

1 Eingrenzung und Erklärung

Was ist Wasserstoff?

Wasserstoff (H) ist das häufigste chemische Element im Universum. Er kommt im Wasser (H_2O) und in den meisten organischen Verbindungen vor. Molekularer Wasserstoff (H_2) ist ein unsichtbares, farb- und geschmackloses Gas. Es ist 14-mal leichter als Luft und enthält einen hohen Brennwert. Ein Kilogramm Wasserstoff enthält etwa dreimal mehr Energie als Benzin und etwa siebenmal mehr als Holzpellets. Allerdings hat gasförmiger Wasserstoff eine niedrigere Energiedichte pro Volumeneinheit (pro Kubikmeter) im Vergleich zu Erdgas. Deshalb wird er für die Speicherung und den Transport in der Regel auf einen hohen Druck verdichtet oder stark gekühlt und verflüssigt.

Grüner, grauer und blauer Wasserstoff
Wasserstoff kann auf verschiedene Arten gewonnen werden. Die aktuell am weitesten verbreitete Methode ist die Dampfreformierung von Erdgas oder Biomasse. Durch die chemische Reaktion von Erdgas – dessen Hauptbestandteil ist Methan (CH_4) – und Wasserdampf (H_2O) entstehen Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff. Eine andere Herstellungsmöglichkeit ist die chemische Reaktion von Strom und Wasser. Kommt der Strom dabei aus dem Strommix oder direkt aus der Kernenergie, spricht man von gelbem bzw. pinkem Wasserstoff. Grün ist er dagegen, wenn der Strom ausschliesslich aus erneuerbaren Energien produziert wird. Grüner Wasserstoff ist in der Produktion CO_2-frei und kann zur Dekarbonisierung beitragen. Er gilt als wichtiger Pfeiler in der Energiewende.

Unerschlossenes Potenzial von weissem Wasserstoff
Ein weitgehend unerforschtes Gebiet betrifft den sogenannten weissen Wasserstoff, der natürlicherweise in unterirdischen Lagerstätten vorkommt. Beispiele sind die Entdeckung von Wasserstoffvorkommen bereits 1987 während Bohrungen in Mali oder erst vor Kurzem, im Jahr 2023, im benachbarten Elsass-Lothringen in Frankreich[2]. Die genaue Grösse dieser Wasserstoffvorkommen unter der Erdoberfläche bleibt jedoch weitgehend Spekulation, wie Expertinnen und Experten sagen. Dennoch zeigt ein Modell der amerikanischen Geologiebehörde USGS auf, dass die Wasserstoffextraktion aus der Erde bis zum Jahr 2100 mehr als die Hälfte des weltweiten Wasserstoffbedarfs decken könnte[3].

Anwendungsfelder

Wasserstoff wird derzeit hauptsächlich als Rohstoff in verschiedenen Industriezweigen genutzt, wie bei der Herstellung von Düngemitteln oder in Raffinerien. Künftig wird Wasserstoff eine zentrale Rolle für die Dekarbonisierung spielen, da er als flexibler Energieträger vielseitig einsetzbar ist. Als erste Priorität soll hierfür der bereits in der Industrie verwendete, hauptsächlich graue Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Parallel dazu soll Wasserstoff in neuen, heute von fossilen Energieträgern abhängigen Industrieprozessen eingesetzt werden; damit lässt sich der CO_2-Ausstoss direkt reduzieren. Wasserstoff kann dazu dienen, Strom aus erneuerbaren Energien zu lagern und in Form von Folgeprodukten (z.B. synthetisches Methan) über weite Strecken zu transportieren. Da bei der Verbrennung bzw. Reaktion von Wasserstoff lediglich

Abbildung 1: Die Farben von Wasserstoff in Abhängigkeit der Produktionsmethode. Zur besseren Übersicht werden nur die wichtigsten Farben und Produktionsmethoden aufgeführt.

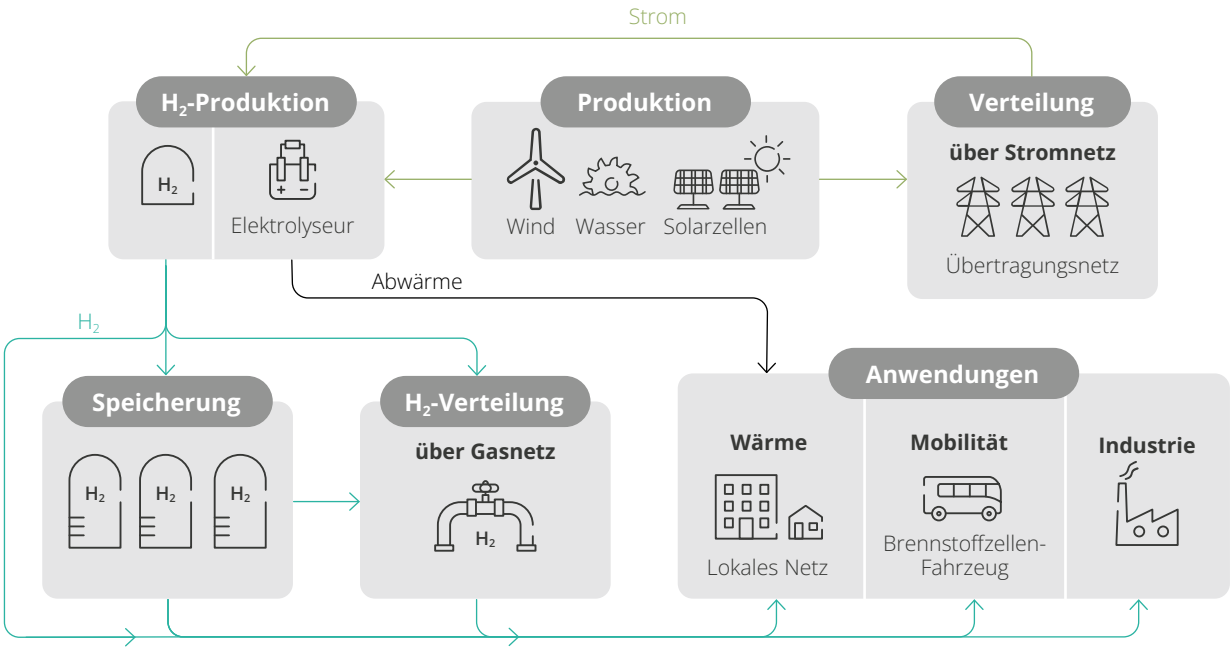

Abbildung 2: Elemente der Wasserstoffwirtschaft

Wasser entsteht, ermöglicht Wasserstoff als sauberer Energieträger die Dekarbonisierung von schwer zu elektrifizierenden Bereichen wie dem Transport (z.B. Schwerlast, Schiff- und Flugverkehr). Eine ausführliche Bewertung der Eignung von Wasserstoff für unterschiedliche Anwendungen ist in der sogenannten Clean Hydrogen Ladder[4] ersichtlich.
So weisen zum Beispiel beim Langstreckentransport Wasserstoff-Brennstoffzellen gegenüber Batterien oder Verbrennungsmotoren Wettbewerbsvorteile auf. Die beschränkte Speicherkapazität von Batterien und der CO_2-Gehalt im Netzstrommix wirken sich nachteilig aus. Verbrennungsmotoren werden von direkten CO_2- und weiteren Schadstoffemissionen belastet. Im Gegensatz dazu sind auch Anwendungen bekannt, in denen der Einsatz von Wasserstoff nicht sinnvoll ist. So wird für die Heizung mit Wasserstoff in einem Eigenheim etwa fünfmal mehr Strom benötigt als mit einer effizienten Wärmepumpe.[5]

Wasserstoff soll dort zum Einsatz kommen, wo eine Elektrifizierung als Ersatz fossiler Energieträger wirtschaftlich oder prozesstechnisch nicht möglich ist.

2 Einführung in die H_2-Produktion
(Komponenten, Energieverbrauch)

Die Herstellung von grünem Wasserstoff erfolgt durch einen Prozess namens Wasserelektrolyse, bei dem erneuerbare Energie verwendet wird. Das zentrale Element einer Elektrolyseanlage ist der Elektrolyseur, der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufspaltet. Unter den für industrielle Anwendungen verfügbaren Elektrolysetechnologien werden am häufigsten alkalische und PEM-Wasserelektrolyseure eingesetzt (PEM steht für Proton Exchange Membrane). Die umliegenden Apparate stellen alle notwendigen Hilfsdienste bereit, von der Wasserreinigung bis zur Stromgleichrichtung, zur Verdichtung des Gases und zur lokalen Speicherung. Der Gesamtenergieverbrauch der Anlage zur Herstellung von 1 Kilogramm Wasserstoff hängt von der Technologie des Gesamtsystems ab. In der Regel liegt dieser Verbrauch zwischen 60 und 65[6] Kilowattstunden (kWh) pro Kilogramm Wasserstoff.

Was ist der LCOH?

Die wichtigste Kennzahl, um die Wirtschaftlichkeit der Produktion von grünem Wasserstoff zu bewerten, sind die als Levelised Cost of Hydrogen (LCOH) bezeichneten gesamten Gestehungskosten. Der LCOH repräsentiert den Preis, zu dem der Hersteller von grünem Wasserstoff die Kosten decken kann. Oder anders gesagt: Der LCOH ist der Preis, zu dem der Anlagenbesitzer während der gesamten Lebensdauer der Anlage den Wasserstoff verkaufen sollte, um Verluste zu vermeiden. Der LCOH ist daher ein entscheidender Indikator, um die wirtschaftliche Rentabilität der Produktion von grünem Wasserstoff zu beurteilen.

Die wichtigsten Faktoren des LCOH sind die Kosten, einschliesslich Investitionen, Betriebskosten und Stromkosten, sowie die jährliche Menge der Wasserstoffproduktion. In beiden Fällen bestehen massgebliche Unsicherheiten, die es erschweren, die Gestehungskosten genau zu bestimmen. Deshalb ist es sinnvoller, beim LCOH über eine Bandbreite und über LCOH-Besonderheiten zu sprechen. Trotzdem müssen auch in diesem Fall einige Annahmen getroffen werden. Typischerweise wird der LCOH in verschiedene Kostenkategorien unterteilt. Dazu gehören der Investitionsaufwand (CAPEX), die Betriebskosten (OPEX), die Stromkosten und andere Kosten wie beispielsweise die Finanzierungskosten. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Kostenstruktur und trägt dazu bei, die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion genauer zu verstehen.

Investitionsaufwand
Der Investitionsaufwand beinhaltet alle erforderlichen Komponenten der Elektrolyseanlage, einschliesslich des Elektrolyseurs, der Wasserreinigungssysteme, des Gleichrichters, der elektronischen Bauteile, des Verdichters, der Vor-Ort-Speicherung und der erforderlichen Bauarbeiten. Über den Investitionsaufwand gibt es eine umfangreiche und weiterhin wachsende Literatur, die einen optimistischen Hang zur Kostenunterschätzung aufweist respektive oft nur Teile der Gesamtinvestition berücksichtigt.

Betriebskosten
Die Betriebskosten (OPEX) stellen die mit der höchsten Unsicherheit behaftete Komponente der Kostenschätzung dar, da sie den Betriebsaufwand sowie die Wartungskosten decken sollten. Betriebskosten stehen in der Regel in einem proportionalen Verhältnis zum Investitionsaufwand und liegen typischerweise im tiefen einstelligen Prozentbereich der Initialinvestition pro Jahr. Die Betriebskosten sollten in Zukunft basierend auf den im Betrieb der Anlagen gesammelten Erfahrungen aktualisiert werden.

Stromkosten
Die langfristigen Stromkosten sind ein entscheidender Treiber für die Gestehungskosten bei der Wasserstoffproduktion und werden im Zeitraum von 2025 bis 2045 gemäss den meisten Marktprognosen voraussichtlich bei CHF 80–100/MWh liegen.

Ein Praxisbeispiel: LCOH-Analyse für eine Beispielanlage

Als Referenzfall für die Analyse des LCOH nimmt man eine Elektrolyseanlage mit einer Lebensdauer von 20 Jahren. Die wichtigsten Annahmen sind in der Tabelle auf Seite 7 oben zusammengefasst:

LCOH – absolute Kosten und Anteil unterschiedlicher Kostenfaktoren, in Abhängigkeit der Strompreise

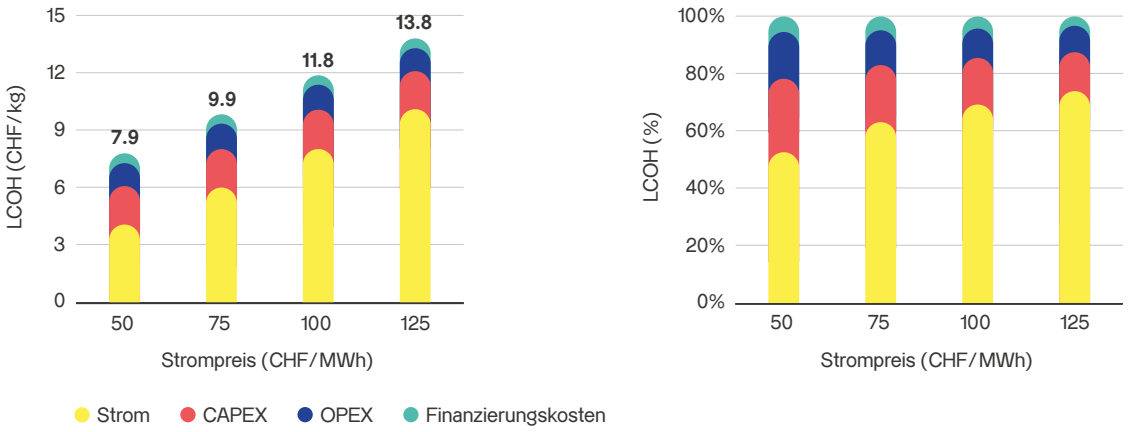

Abbildung 3: LCOH in Abhängigkeit des Strompreises (links); prozentuelle Anteile unterschiedlicher LCOH-Kostenfaktoren bei unterschiedlichen Strompreisen (rechts)

Annahmen	Werte
Elektrolyseurleistung	2.5 MW (ca. 45 kg H_2 pro Stunde)
Investitionsaufwand (CAPEX)	CHF 7.5 Millionen
Betriebskosten (OPEX)	CHF 300 000 pro Jahr
Stromkosten	CHF 50–125/MWh
Durchschnittliche Auslastung	85% (7446 Betriebsstunden p.a.)

Tabelle 1: Annahmen für LCOH-Berechnung

Die Investition von ca. CHF 7.5 Millionen für eine 2.5-MW-Elektrolyseanlage ist gemäss unserer Projekterfahrung realistisch. Die jährlichen Betriebskosten von CHF 300 000 entsprechen 4% der Investition und sind als eine Prognose zu betrachten, die im Anlagenbetrieb noch zu validieren ist. Mit dem Stromkostenbereich von CHF 50–125/MWh deckt man ein breites Spektrum der Strompreisszenarien während der Lebensdauer der Elektrolyseanlage ab.

Abbildung 3 (Seite 6 unten) zeigt den LCOH und dessen Aufteilung in die verschiedenen Komponenten (CAPEX, OPEX, Stromkosten und Finanzierungskosten) für verschiedene durchschnittliche Strompreisniveaus. Wie bereits erwähnt, ist der Strompreis der Haupttreiber der Gestehungskosten bei der Wasserstoffproduktion. Der Kostenanteil für die Strombeschaffung liegt im Bereich zwischen 50% und 75% des LCOH. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Stromkosten für die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion.

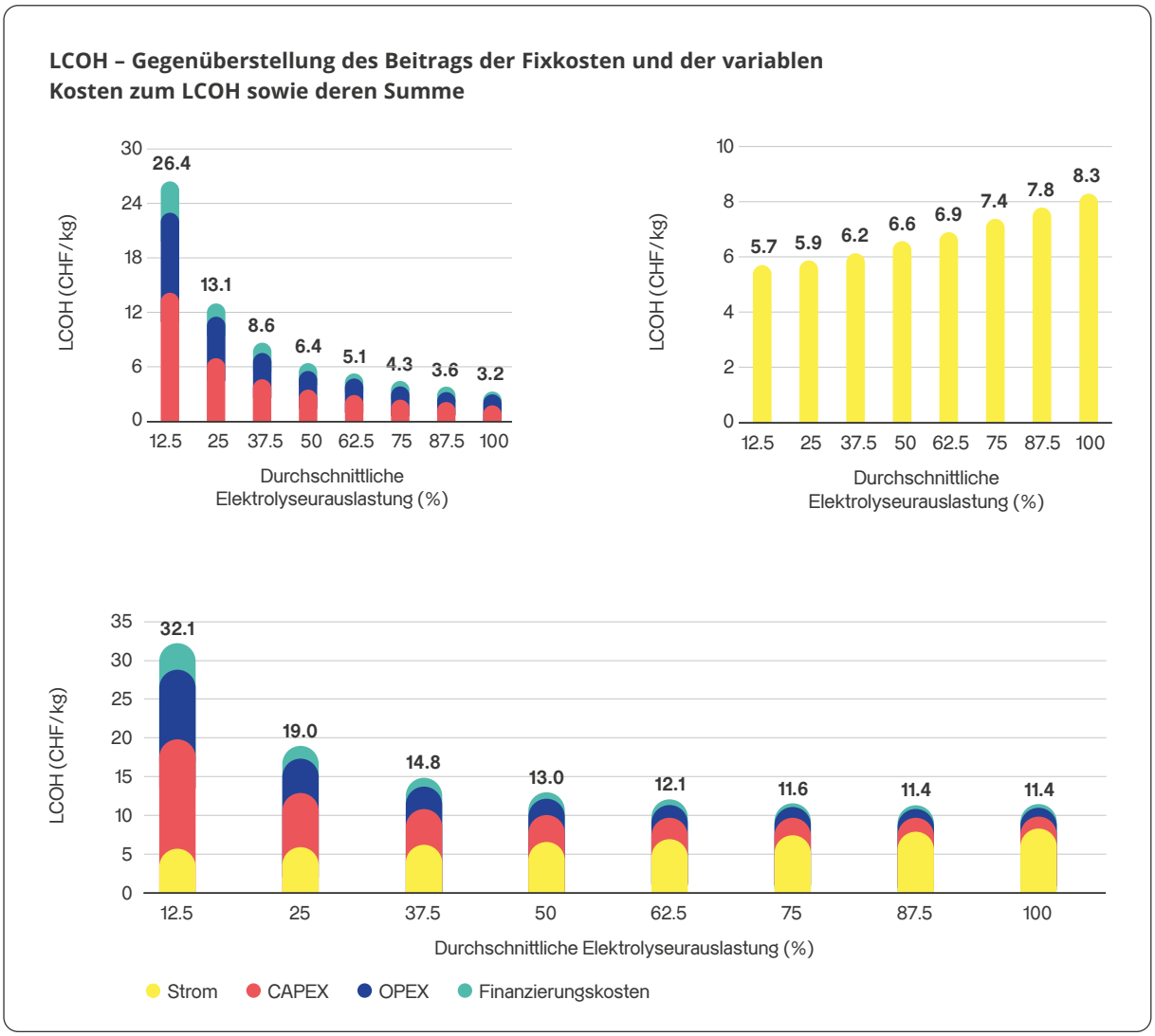

Abbildung 4: Beitrag der Fixkosten (links oben) und der variablen Kosten (rechts oben) zum LCOH sowie die Summe beider Kostenkategorien (unten), in Abhängigkeit der Elektrolyseurauslastung

Die Optimierung des Einsatzes von Elektrolyseanlagen spielt wegen kurzfristigen Strompreisschwankungen also eine entscheidende Rolle und beeinflusst massgeblich die Gesamtkosten der Wasserstoffproduktion.

Zudem hängt der LCOH stark von den effektiven Betriebsstunden (der Auslastung) ab, wie in Abbildung 4 (Seite 7) dargestellt. Die Grafik zeigt deutlich zwei sich überlagernde Effekte: Auf der einen Seite ermöglichen mehr Betriebsstunden, die Fixkosten über eine grössere Produktionsmenge zu verteilen. Andererseits kann bei geringerer Auslastung von günstigeren Strompreisen für die Wasserstoffproduktion profitiert werden. In Abbildung 4 (unten) sind diese gleichzeitig auftretenden und entgegengesetzten Effekte kombiniert dargestellt und es wird ab einer Elektrolyseurauslastung von etwa 85% ein Gleichgewicht erreicht.

Daher kann man den Schluss ziehen, dass die Idee, Elektrolyseure ausschliesslich zur Speicherung von Solarstrom zu verwenden, mit einer zu erwartenden Auslastung von unter 25% keinen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb zulässt. Für einen effizienten Betrieb von Elektrolyseuren wird in der Schweiz und in ihren Nachbarländern deshalb in der Regel eine Kombination verschiedener erneuerbarer Stromquellen angestrebt.

3 Potenzial

Wasserstoff, als flexibler Energieträger und Treibstoff, kann eine wichtige Rolle bei der Energiewende spielen. Insbesondere beim globalen Umbau des Energiesystems hin zu mehr Stromproduktion aus volatilen erneuerbaren Produktionsquellen gewinnen Energiespeichermöglichkeiten an Bedeutung.

Wasserstoff und seine Derivate können zeitlich und örtlich flexibel aus erneuerbarem Strom, wie Solar- und Windenergie, hergestellt werden. Die Produktion kann also unabhängig vom Zeithorizont und der Entfernung am effizientesten Ort erfolgen und die Energie wird zum Verwendungsort transportiert.

Wasserstoff ist zwar nicht die alleinige Lösung zur Bewältigung der Winterstromlücke, jedoch hat er eine wichtige Rolle inne im Zusammenspiel unterschiedlicher Technologien zur Gewährleistung einer sicheren und stabilen Energieversorgung in der Zukunft. Obwohl die wirtschaftliche Umsetzung noch in weiter Ferne liegt, darf das langfristige Potenzial der Energieimporte in Form von Wasserstoff oder seinen Folgeprodukten mit eventueller Rückverstromung über Wasserstoffkraftwerke nicht unbeachtet bleiben.

Bereits heute kann Wasserstoff in begrenzten Mengen gelagert und über weite Strecken transportiert werden. Dies eröffnet vielfältige Möglichkeiten für eine Energieversorgung, die frei von Kohlenstoffemissionen ist.

Eine integrierte Wasserstoffwirtschaft würde verschiedene Sektoren wie Mobilität, Wärme, Industrie und Verstromung zu einem Gesamtsystem verbinden. Wasserstoff kann in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden, sei es zur Fortbewegung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen, zur Energiespeicherung oder in industriellen Prozessen.

Neue Anwendungen wie zum Beispiel die Herstellung von Ammoniak, Methanol und anderen chemischen Verbindungen aus Wasserstoff entwickeln sich. Während Lösungen für den Individualverkehr wenig wirtschaftlich sind, sieht es für die Transportbranche mit LKWs, Schiffen und Flugzeugen vielversprechender aus. Dort würden zusätzlich zum Wasserstoff auch synthetische Treibstoffe auf Wasserstoffbasis zum Einsatz kommen. Darüber hinaus bietet der Einsatz von grünem Wasserstoff in der Industrie ein massgebliches Potenzial zur Reduktion von bestehenden Treibhausgasemissionen.

Beim Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft bleiben diverse Herausforderungen zu bewältigen, wie der Energieverlust bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und seinen Derivaten oder die nur eingeschränkt mögliche kompakte Speicherung. Obwohl Wasserstoff als Speichertechnologie im Vergleich zu Batterien eine deutlich höhere Energiedichte pro Kilogramm aufweist, erfordert er aufgrund des grösseren nötigen Volumens für diese Energiedichte eine Verdichtung unter hohem Druck. An allen Fronten werden dennoch kontinuierliche Fortschritte erzielt: Technische Entwicklungen tragen dazu bei, die Energieverluste weiter zu reduzieren, und effektivere Speichermöglichkeiten werden erforscht.

Wie viel Wasserstoff braucht die Schweiz?

In der Schweiz werden Anwendungen von Wasserstoff im Mobilitätssektor im Vordergrund stehen, bedingt durch hohe Transportkosten und die benötigte Feinverteilung. Die mit der Dekarbonisierungsstrategie kompatible Deckung der breit diskutierten Winterenergielücke wird wahrscheinlich durch Importe von Wasserstoffderivaten erfolgen müssen. Beispielsweise ist der Einsatz von Wasserstoff in allen Szenarien der Studie Energieperspektiven 2050+ des Bundesamts für Energie (BFE) (im Folgenden EP 2050+) notwendig, die von einer vollständigen Dekarbonisierung der Schweiz ausgehen.

Vor diesem Hintergrund stellen wir unterschiedliche Modelle einander gegenüber, die den künftigen Bedarf an reinem Wasserstoff* in der Schweiz berechnen. Abbildung 5 zeigt diesen Bedarf in unterschiedlichen Szenarien des Axpo Power Switchers und als Ergebnis der Studie EP 2050+ im Szenario ZERO Basis. Die Modellierung im Axpo Power Switcher berücksichtigt kritische Änderungen der Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel wenig Produktion aus Anlagen mit erneuerbarer Energie in ganz Europa, geringe Gasverfügbarkeit, wenig Kernenergie in Frankreich etc. Der Wasserstoffbedarf wird im Axpo Power Switcher zur Einschätzung der Auswirkungen einer zusätzlichen Nachfrage auf dem Strommarkt, bedingt durch die Elektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff, berechnet.

Eine nähere Analyse von Abbildung 5 zeigt, dass die Ergebnisse beider Modelle in den nächsten Jahren im Zug des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft grössere Abweichungen beim erwarteten Wasserstoffbedarf aufweisen. Im Verhältnis zum prognostizierten Wasserstoffbedarf verringert sich diese Differenz jedoch deutlich gegen Ende der Betrachtungsperiode bis 2050.

In der Studie EP 2050+ wird zusätzlich zwischen Importen, die ab 2040 möglich werden (durch Anschluss an den European Hydrogen Backbone), und inländischer Wasserstoffproduktion unterschieden. Bei dieser Unterscheidung spielt insbesondere die Abwägung zwischen der höheren Versorgungssicherheit bei lokaler Produktion und den wirtschaftlichen Aspekten der erwartungsgemäss kostengünstigeren Importe eine Rolle.

Zusammengefasst lässt sich sagen: Kurzfristig besteht eine hohe Unsicherheit in den Prognosen, und die Frage, wann die Wasserstoffproduktion und -nutzung richtig Fahrt aufnehmen wird, bleibt bestehen. Langfristig gibt es jedoch einen bedeutenden Bedarf an Wasserstoff in der Schweiz.

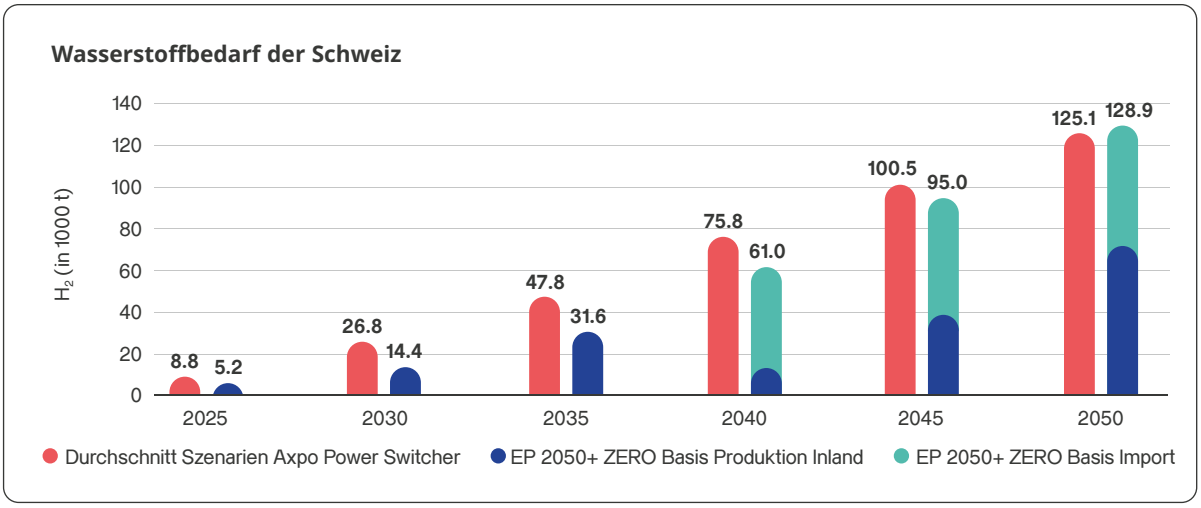

Abbildung 5: Modellierter Wasserstoffbedarf der Schweiz. Gegenüberstellung Szenarien Axpo Power Switcher** und Studie Energieperspektiven 2050+[7].

* Bedarf an reinem grünem Wasserstoff. Wasserstoffbedarf für Folgeprodukte, wie z.B. Power-to-Liquid-Anwendungen, ist nicht dargestellt.

** Axpo Power Switcher, Stromnachfrage für Wasserstoffproduktion (Umrechnung von TWh in Tonnen). Vorgehen: 2 Extremszenarien und ein Doppelszenario entfernt, dargestellt ist der berechnete durchschnittliche Wasserstoffbedarf der verbliebenen 9 Szenarien.

4 Wasserstoff in der Schweiz

- Der Bundesrat hat 2019 beschlossen, dass die Schweiz bis 2050 bei den Treibhausgasemissionen Netto-Null anstrebt[8] und so ihren Verpflichtungen aus dem Pariser Übereinkommen nachkommt. Um dies zu erreichen, soll gemäss der Regierung auch der Einsatz von grünem Wasserstoff insbesondere in schwer zu elektrifizierenden Bereichen erfolgen.

- Zur Analyse des erwarteten Bedarfs wurden diverse Studien durchgeführt (siehe Kapitel 3). Dabei ist hervorzuheben, dass sämtliche Szenarien der Studie EP 2050+ zum Erreichen von Netto-Null strombasierte Energieträger benötigen.

- Das Bundesamt für Energie (BFE) erarbeitet bis voraussichtlich November 2023 eine «Wasserstoff-Auslegeordnung»[9], die aufzeigen soll, in welchen Bereichen die Verwendung von Wasserstoff sinnvoll ist, wo und wie er produziert und gespeichert werden kann und welche regulatorischen Rahmenbedingungen für den gezielten Aufbau eines Wasserstoffmarktes in der Schweiz nötig sind. Darauf soll im Jahr 2024 eine Wasserstoffstrategie für die Schweiz folgen.

- Der Wasserstoffsektor in der Schweiz erhielt bisher keine dezidierten Fördermittel. Mit dem Ende September 2023 vom Schweizer Parlament beschlossenen Mantelerlass[10] wird den Betreibern von Wasserstoff-Pilotanlagen auf Antrag bis insgesamt 200 MW Netznutzungsentgelt zurückerstattet. Eine Rückerstattung wäre auch dann möglich, wenn man den Wasserstoff wieder verstromen würde. Eine dezidierte Förderung gibt es indes weiterhin nicht. Bisherige Projekte, wie etwa das Mobilitätsökosystem Hydrospider oder Produktionsanlagen für grünen Wasserstoff, sind aus Eigeninitiative der Wirtschaft entstanden.

- Grössere Stromkonzerne*** in der Schweiz bauen ihre Wasserstoff-Produktionskapazitäten im Rahmen von (Pilot-)Projekten bis aktuell maximal ca. 10 MW Leistung aus. Bis Ende 2023 werden neben Axpo auch Alpiq, SAK und Groupe E in der Schweiz grünen Wasserstoff aus Wasserkraft herstellen.

- Zudem betreiben die Kehrichtverbrennungsanlagen KVA Buchs und Limeco Elektrolyseure, mit denen aus Abfall und Abwasser erneuerbares Gas produziert wird.

- Per Ende 2023 sind in der Schweiz geschätzt etwa 13 MW Elektrolyseleistung in Betrieb.

- In den kommenden fünf Jahren könnten bei förderlichen Rahmenbedingungen weitere 50–100 MW Elektrolyseleistung hinzukommen.

- Es ist langfristig unwahrscheinlich, dass die Produktionskapazität die Nachfrage nach Wasserstoff und seinen Derivaten in der Schweiz decken kann. Bereits die Bestrebungen zur direkten Elektrifizierung führen erwartungsgemäss zur Verschärfung der Stromlücke. Der produzierte Strom soll in erster Linie direkt eingesetzt werden. Wasserstoff und seine Derivate werden künftig zwangsläufig auch aus dem Ausland importiert und der effiziente Zugang zu Infrastruktur und Märkten wird entscheidend.

- In der Forschungslandschaft hervorzuheben ist insbesondere die angekündigte grüne Energie-Koalition[11] der beiden Eidgenössischen Technischen Hochschulen mit über 20 weiteren Industriepartnern – darunter Axpo – und zugesicherter Unterstützung der Wyss Foundation. Die Koalition soll bis Ende 2023 formell gegründet werden, und ab 2028 sollen im Rahmen der Koalition aufgebaute Demonstratoren im Megawatt-Bereich produktiv werden.

*** Zur Vereinfachung werden jeweils nur Hauptaktionäre der Wasserstoff-Produktionsanlagen aufgeführt, wobei einige der Anlagen als Partnerschaften realisiert wurden.

5 Herausforderungen und Fazit

- Derzeit ist die Herstellung von Wasserstoff noch teuer und energieintensiv. Die meisten Wasserstoffquellen sind in Bezug auf die Kosten noch nicht in der Lage, mit fossilen Brennstoffen zu konkurrieren. Sollten die Gestehungskosten sinken, könnten immer mehr Anwendungen wirtschaftlich attraktiv werden.

- Die Wasserstoff-Infrastruktur ist noch nicht ausreichend entwickelt, um eine breitere Anwendung von Wasserstoff zu ermöglichen. Es fehlen weiterhin Pipelines für den Wasserstofftransport sowie ausreichende Produktionskapazitäten für Elektrolyseure. Ein Rückbau respektive eine Umnutzung der bestehenden Gastransport-Infrastruktur erfordert eingehende Analysen, eine ausführliche Planung sowie eine technische und zeitliche Koordination mit dem Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur.

- Wasserstoff ist ein sehr leichtes Gas und benötigt daher spezielle Tanks zur Speicherung. Derzeit sind die verfügbaren Technologien für die Speicherung von Wasserstoff begrenzt und können eine langfristige Speicherung in ausreichenden Mengen noch nicht gewährleisten.

- Wasserstoff wird aktuell überwiegend aus fossilen Brennstoffen hergestellt, was zu hohen Kohlenstoffemissionen führt. Die Bemühungen, Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft, Wind- oder Solarenergie zu produzieren, bringen jedoch erste Ergebnisse hervor und belegen, dass grüner Wasserstoff inklusive seiner Derivate eine bedeutende Rolle in der nachhaltigen Energieversorgung übernehmen kann.

- Zusammenfassend ist Axpo vom Potenzial des grünen Wasserstoffs als sauberem, erneuerbarem und vielseitigem Energieträger überzeugt. Als Antriebslösung für LKWs, Schiffe und Flugzeuge oder im globalen Kontext auch für Autos und Züge können Wasserstoff und seine Derivate fossile Brennstoffe ersetzen und die Mobilität emissionsfrei machen. Die am effizientesten Ort produzierte und als Wasserstoff oder Derivat gespeicherte Energie kann zudem in der Industrie und der Energieversorgung jederzeit an den Bestimmungsort transportiert und eingesetzt werden. Wasserstoff ist somit eine Investition in die Zukunft und kann sich zu einem essenziellen Energieträger in einer klimaneutralen Gesellschaft entwickeln. Die Politik ist gefordert, zeitnah die Weichen richtig zu stellen und damit Wasserstoffanwendungen in diversen Branchen zu ermöglichen und zu unterstützen.

Literaturverzeichnis

1 European Hydrogen Backbone (EHB) News vom 5. September 2023: «European Hydrogen Backbone Welcomes New Member Transitgas AG», https://ehb.eu/newsitems#european-hydrogen-backbone-ehb-welcomes-new-member-transitgas-ag-joins-the-journey-towards-clean-energy-future, zuletzt besucht am 6. November 2023.

2 Euractiv Media Network vom 5. Juli 2023: «Excitement grows about 'natural hydrogen' as huge reserves found in France», https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/excitement-grows-about-natural-hydrogen-as-huge-reserves-found-in-france/, zuletzt besucht am 6. November 2023.

3 NZZ Magazin vom 4. März 2023: «Wasserstoff: Der grüne Schatz», https://magazin.nzz.ch/nzz-am-sonntag/wissen/wasserstoff-der-gruene-schatz-ld.1728182, zuletzt besucht am 6. November 2023.

4 Michael Liebreich/Liebreich Associates auf LinkedIn vom 20. Oktober 2023: Hydrogen Ladder Version 5.0, https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-ladder-version-50-michael-liebreich/, zuletzt besucht am 6. November 2023.

5 Clean Energy Wire vom 20. Juli 2023: «Q&A – Heating with hydrogen: Clean alternative or pipe dream?», https://www.cleanenergywire.org/factsheets/qa-heating-hydrogen-clean-alternative-or-pipe-dream, zuletzt besucht am 6. November 2023.

6 PSI – Paul Scherrer Institut im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) vom September 2022: «Stromspeicherung und Wasserstoff – Technologien, Kosten und Auswirkungen auf das Klima», S. 27 (PEM-Elektrolyseur 55 kWh/kg H_2 + Umsysteme und Verdichtung = ca. 60–65 kWh/kg H_2), https://www.psi.ch/de/media/77703/download?attachment, zuletzt besucht am 6. November 2023.

7 Prognos AG, TEP Energy GmbH, Infras AG im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) vom 27. Oktober 2022: «Energieperspektiven 2050+, Exkurs Wasserstoff», Verbrauch strombasierter Energieträger und inländische Erzeugung (nur PtH_2) im Szenario ZERO Basis mit der Annahme von 5000 Betriebsstunden pro Jahr und 58 kWh/kg H_2, https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11143, zuletzt besucht am 6. November 2023.

8 Bundesamt für Energie (BFE) vom 27. September 2022: «Thesen zur künftigen Bedeutung von Wasserstoff in der Schweizer Energieversorgung», https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11103, zuletzt besucht am 6. November 2023.

9 Das Schweizer Parlament vom 18. Dezember 2020: «20.4709 Postulat: Wasserstoff. Auslegeordnung und Handlungsoptionen für die Schweiz», https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20204709, zuletzt besucht am 6. November 2023.

10 Das Schweizer Parlament vom 07.05.2021: «21.047 Geschäft des Bundesrates: Sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Bundesgesetz», https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20210047, zuletzt besucht am 12. November 2023.

11 ETH Zürich Medienmitteilung vom 8. Juni 2023: «ETH Zürich und EPFL lancieren grüne Energie-Koalition», https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2023/06/eth-zuerich-und-epfl-lancieren-gruene-energie-koalition.html, zuletzt besucht am 6. November 2023.

Impressum
Erstpublikation: 14. November 2023
Revision 1.0. Januar 2024: Diverse Korrekturen, Aktualisierung der Zahlen und Szenarien im Zuge der Veröffentlichung des neuen Axpo Power Switchers
Revision 1.1. Oktober 2024: Neuauflage und Designaktualisierung mit Bild der Axpo Anlage in Domat/Ems

Editorial Team:
- Hauptautoren: Luka Cuderman, Stephan Weber
- Expertinnen und Experten sowie Mitwirkende: Matteo Rosso, Simon Weiher, Guy Bühler, Martin Koller, Jeanette Schranz, Claus Huber
- Design & Produktion: Aorta Design GmbH, Baden
- Titelbild: Beyonder GmbH, Gebenstorf
- Lektorat: sprach-art, Wettingen

Hinweis zum Titelbild
Warum haben wir uns beim Titelbild für ein KI-generiertes Bild entschieden? Das Cover des White Paper ist das Erste, was Sie als Leserin oder Leser sehen, deswegen wollten wir bereits zu Beginn einen Eyecatcher haben. Aktuell sind aussagekräftige und einprägsame Grafiken rund um das Thema Wasserstoff noch Mangelware. Immer wieder trifft man auf ähnliche, gleich gelagerte Visualisierungen. Passend zum zukunftsgerichteten Thema des White Paper haben wir uns für eine KI-basierte Bildgenerierung entschieden. Mithilfe der künstlichen Intelligenz konnten wir anhand von spezifischen Stichwörtern Inspiration zu Wasserstoffanlagen der Zukunft einholen und dank der Unterstützung eines professionellen Grafikers unseren Brand einfliessen lassen. Grössenverhältnisse und entsprechende Einbettungen in die Landschaft können dabei von realistischen Visualisierungen und konkreten Projektplänen abweichen. Mit dem Cover des White Paper – passend zum Thema Wasserstoff – vereinen wir Zukunftsvision und hohen Qualitätsanspruch.

Hinweis zum Bild auf der Rückseite
Die mit grünem Strom aus der Wasserkraft gespeiste Wasserstoffproduktionsanlage ist in der Schweiz die bislang grösste ihrer Art und wurde von Axpo zusammen mit der lokalen Partnerin Rhiienergie im Frühling 2024 eröffnet. Dies zusammen mit Vertreterinnen und Vertretern aus Politik und Wirtschaft. Die 2.5 MW starke Anlage kann jährlich bis zu 350 Tonnen grünen Wasserstoff produzieren. Das entspricht der Einsparung von rund 1.5 Millionen Litern Diesel. Sie steht in Domat/Ems, direkt beim Wasserkraftwerk Reichenau.

Disclaimer
Diese Veröffentlichung wurde als Überblick über die Rolle und das Potenzial der Wasserstoffwirtschaft in der Schweiz und ausschliesslich zu Informationszwecken erstellt. Die in diesem Dokument wiedergegebenen Meinungen stellen die Überlegungen und Bestrebungen von Axpo zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dar. Sie können sich aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung verändern.
Für die in diesem Dokument enthaltenen Informationen wird – weder ausdrücklich noch stillschweigend – Gewähr geleistet. Das Dokument enthält Aussagen, die sich auf künftige Ereignisse beziehen, die von der Natur der Sache her spekulativer Art sind. Solche Aussagen spiegeln lediglich die zu dem spezifischen Zeitpunkt reflektierte Lageeinschätzung wider. Handlungen auf der Grundlage dieses Dokuments liegen in der Verantwortung der Handelnden. Jegliche Haftung für Schäden, die sich direkt oder indirekt aus der Nutzung dieses Dokuments ergeben können, wird abgelehnt.

Mehr Informationen zum Thema Wasserstoff bei Axpo:
https://www.axpo.com/ch/de/ueber-uns/energiewissen.detail.html/energiewissen/hydrogen.html

Axpo Holding AG

Parkstrasse 23
CH-5401 Baden
T +41 56 200 31 11
axpo.com