

Energie Kompass PSI

Orientierung für die Energiewende
#1 / 2026

Wasserstoff und das Energie-Puzzle

Welche Rolle spielen kohlenstoffarme
Moleküle auf dem Weg zur Klimaneutralität?



8
Es sind Prioritäten
gefragt

12
Wasserstoff im
Schweizer
Energiesystem:
Mehr als ein
Energieträger

16
Branchenschwerpunkt:
Luftfahrt

22
Branchenschwerpunkt:
Schifffahrt



Editorial

Wasserstoff, das leichteste und einfachste chemische Element im Universum, wird ein wichtiger Bestandteil der Energiewende sein. Aber Wasserstoff ist umstritten. Von einigen als «Schweizer Taschenmesser» der Energiewende gepriesen, als Allheilmittel für alle denkbaren Herausforderungen des Energiesystems, sehen ihn andere als zu teuer, zu ineffizient und zu gefährlich an, um eine bedeutende Rolle zu spielen. Die Realität liegt wohl dazwischen, wie wir in unserer zweiten Ausgabe des PSI Energie-Kompass darlegen.

Wasserstoff hat zahlreiche Vorteile. Seine Nutzung verursacht keine Treibhausgasemissionen, er kann gespeichert werden und vielfältige Funktionen in der Wirtschaft erfüllen, etwa als Treibstoff oder zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme. Ein weiterer Vorteil: Aus Wasserstoff lassen sich einfach zu nutzende Energieträger herstellen, darunter sogenannte synthetische Kraftstoffe wie Methanol und Ammoniak.

Wasserstoff hat aber auch Nachteile. Seine nachhaltige Herstellung ist teuer. Zudem kann das winzige Molekül leicht entweichen, wenn die ursprüngliche Speicher- und Transportinfrastruktur für Erdgas ausgelegt ist. Und ein Entweichen würde die Erderwärmung weiter ankurbeln, da Wasserstoff als Treibhausgas wirkt. Zwar ist die Energiedichte pro *Masseneinheit* recht hoch, pro *Volumeneinheit* jedoch gering – das bedeutet, dass die Speicherung viel Platz benötigt, was etwa für Anwendungen in der Luftfahrt ungünstig ist. Wasserstoff neigt auch dazu, die für Pipelines verwendeten Stahlsorten zu verspröden, wodurch sich ihre Lebensdauer im Vergleich zur Verwendung bei anderen Gasen verkürzt. Er ist explosiver als andere Gase, was ein Sicherheitsrisiko darstellen und wiederum zu einer geringeren gesellschaftlichen Akzeptanz führen kann. Schliesslich ist die Herstellung von Wasserstoff auf nachhaltigem Wege in der Regel energie- und ressourcenintensiver als Alternativen wie die direkte Elektrifizierung von Prozessen.

Trotz dieser Nachteile herrscht in der Wissenschaft zunehmend Einigkeit darüber, dass Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger in bestimmten Bereichen sinnvoll sind. Allerdings erfordern selbst diese begrenzten Anwendungsbereiche eine deutliche Ausweitung der Wasserstoffproduktion und sind mit zahlreichen Kompromissen verbunden, wie wir auf den folgenden Seiten erläutern.

Damit Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger eine Rolle spielen können, müssen noch einige Hindernisse aus dem Weg geräumt werden: allen voran die hohen Kosten und die fehlende Planungssicherheit. In dieser Ausgabe untersuchen wir die potenziellen Rollen von Wasserstoff und seinen Derivaten sowie die Chancen und Herausforderungen, die sie für eine klimaneutrale Zukunft mit sich bringen.

Redaktionsteam

Labor für Energiesystemanalysen
Paul Scherrer Institut PSI

Inhalt

- 3 **Weg von fossilen Energieträgern**
- 6 **Der Wasserstoff-Regenbogen**
- 8 **Es sind Prioritäten gefragt**
- 10 **Grüner Wasserstoff verlangt ökologische Kompromisse**
- 12 **Wasserstoff im Schweizer Energiesystem: Mehr als ein Energieträger**
- 14 **Auf dem Spielfeld der Energiemärkte**

Branchenschwerpunkt:
Luftfahrt
- 16 **Nachhaltige Flugtreibstoffe als Lösung im Flugverkehr?**
- 18 **«Die Dekarbonisierung stellt die Luftfahrt vor erhebliche Herausforderungen.»**
Gespräch mit Ramon Hess und Gabriel Müller

Branchenschwerpunkt:
Schifffahrt
- 22 **Dekarbonisierung der Schifffahrt**
- 24 **«Die Schiffe können schon heute mit diesen neuen Brennstoffen fahren.»**
Gespräch mit Daniel Bischofberger

27 Ausblick

Titelbild
Wasserstoffmoleküle
Bild: Monika Blétry, PSI



Weg von fossilen Energieträgern

Ein nachhaltiges Energiesystem muss ohne Erdöl, Kohle und Erdgas auskommen. Alternativen sind gefragt. Wäre Wasserstoff eine Option?

Das Ziel scheint klar zu sein: Bis Mitte dieses Jahrhunderts muss der Ausstoss von Treibhausgasen auf Netto-Null gesenkt werden. Das ist nötig, um die globale Erwärmung bei zwei Grad Celsius oder weniger zu begrenzen, was unserem Klimaziel gemäss dem Pariser Abkommen entspricht. Der Weg zu diesem Ziel ist allerdings noch weit – und vor allem unklar. Denn um die Emissionen der wichtigsten Treibhausgase CO₂ und Methan auf ein Minimum zu senken, müssen Erdöl, Kohle und Erdgas aus unserer Energieversorgung verschwinden. Allerdings decken diese fossilen Energieträger heute – allen Klimaschutzbemühungen zum Trotz – immer noch mehr als 80 Prozent des weltweiten Primärenergiebedarfs. In der Schweiz ist dieser Primärenergie-Anteil dank Strom aus Wasser- und Kernkraftwerken mit knapp 50 Prozent deutlich geringer. Dennoch ist es auch hierzulande eine Mammutaufgabe, Heizöl und Erdgas zum Heizen, Benzin, Diesel und Kerosin für den Verkehr sowie Erdgas für die Industrie durch nachhaltige Alternativen zu ersetzen.

Aber welche Alternativen kommen denn überhaupt in Frage?

Zum einen: Strom aus erneuerbaren Energien und aus Kernenergie, denn diese verursachen kaum Treibhausgasemissionen. In vielen Fällen kann Strom fossile Energieträger unmittelbar ersetzen, wenn die passenden Technologien vorhanden sind, wie zum Beispiel batterieelektrische Autos oder Wärmepumpen.

Zum anderen: Wasserstoff (H_2) – sofern er nachhaltig hergestellt wird. Dieser kann direkt verwendet oder dazu genutzt werden, in Kombination mit Kohlendioxid (CO_2) synthetische Kohlenwasserstoffe wie Kerosin, Methan, Diesel oder Benzin herzustellen.

Die Verwendung von Wasserstoff in Reinform ist jedoch nicht einfach. Soll er direkt eingesetzt werden, braucht es spezielle Technologien und Prozesse – zum Beispiel Brennstoffzellenfahrzeuge statt Verbrennern. Der Transport und die Speicherung von Wasserstoff sind alles andere als trivial, weil Wasserstoff aufgrund seiner geringen Energiedichte (siehe Abbildung 1) stark komprimiert werden muss. Das erfordert hohen Druck oder tiefe Temperaturen sowie geeignete Materialien wie Kohlefasertanks oder Pipelines aus speziellem Stahl. Kompression und Kühlung benötigen zudem viel Energie, was ebenso wie die speziellen Materialien zu hohen Kosten führt.

Synthetische Kohlenwasserstoffe hingegen haben ein breites Anwendungsspektrum: Kerosin, Methan, Diesel oder Benzin, hergestellt aus Wasserstoff und CO_2 , können die heute genutzten fossilen Energieträger eins zu eins ersetzen – mit derselben Infrastruktur für Transport und Speicherung.

Wasserstoff und seine Treibhausgasemissionen

Wasserstoff ist wie Strom ein sogenannter «sekundärer Energieträger» – also einer, der ebenso wie Strom erzeugt werden muss. Das kann auf viele Arten geschehen. Um die verschiedenen Arten der Wasserstoffproduktion zu unterscheiden, hat sich ein Farbschema eingebürgert (siehe «Der Wasserstoff-Regenbogen»). Dieses ist eng verknüpft mit den Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung verursacht werden.

Damit Wasserstoff möglichst wirksam zum Klimaschutz beitragen kann, muss seine Produktion mit sehr geringen Treibhausgasemissionen verbunden sein. Dabei ist die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen, von der Gewinnung der Ressourcen bis zu deren Umwandlung in Wasserstoff.

Am besten erfüllen grüner und rosa Wasserstoff den Anspruch der geringen Treibhausgasemissionen. Auch blauer und türkiser Wasserstoff können diesem

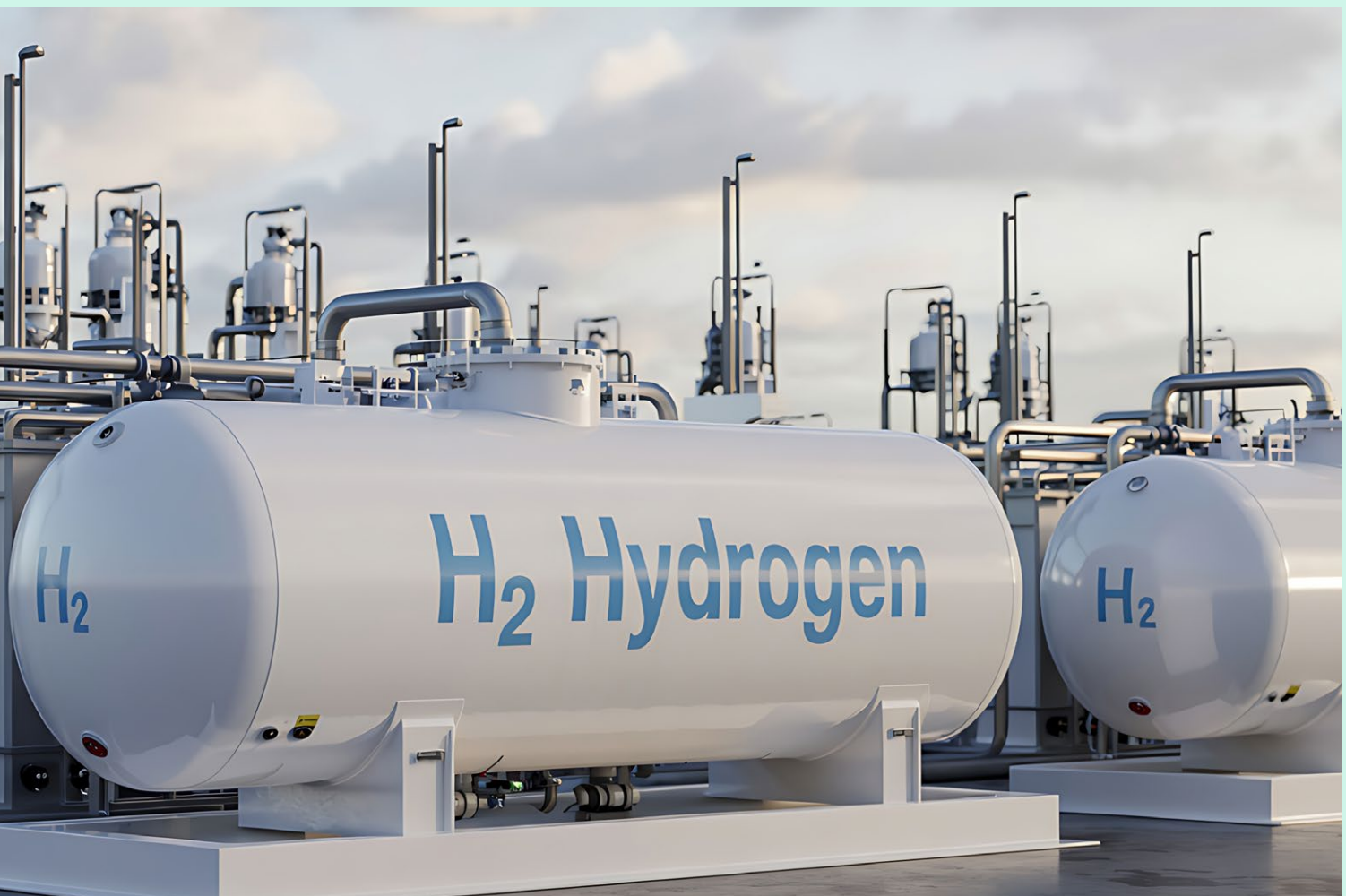
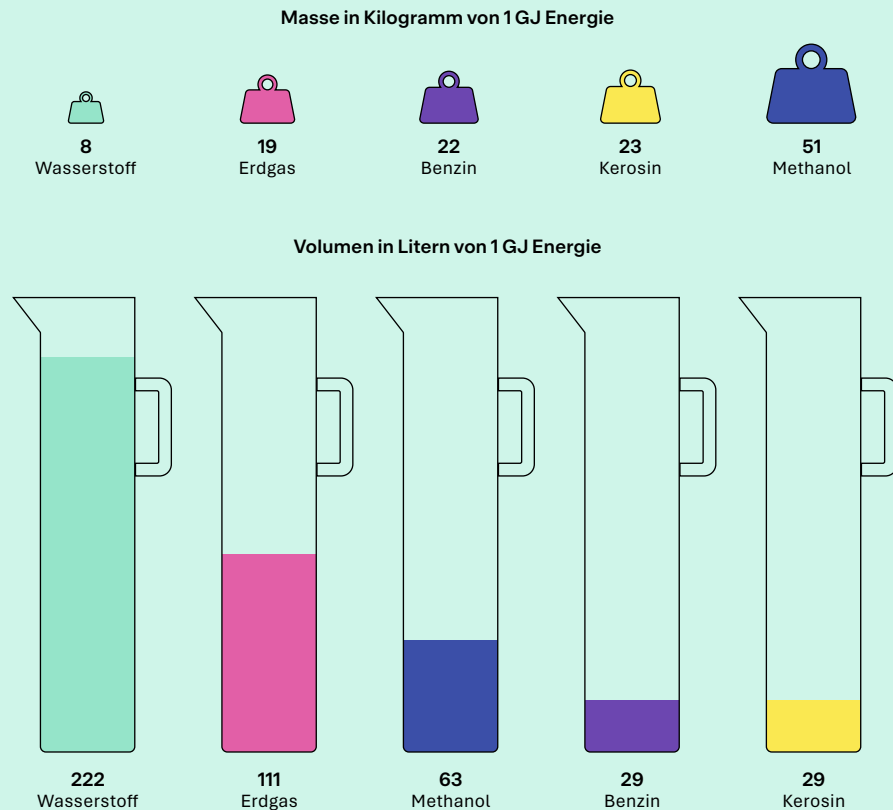
Anspruch gerecht werden, allerdings nur, wenn die Methanemissionen der Erdgasversorgung gering sind und der grösste Teil des bei der Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas freiwerdenden Kohlenstoffs dauerhaft gespeichert wird. Für Wasserstoff aus Biomasse hat sich bisher keine Farbe etabliert. Dennoch könnte dieser wichtig werden. Denn auch die Biomassevergasung ist eine Möglichkeit, Wasserstoff mit sehr geringen Treibhausgasemissionen herzustellen. Brauner und grauer Wasserstoff, die heute rund 85 Prozent der weltweiten Produktion ausmachen, haben keinen Platz in der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft, wenn wir die Klimaziele erreichen wollen. Sie verursachen zu viele Treibhausgase.

Von einer Umstellung auf grünen und blauen Wasserstoff ist bisher kaum etwas zu sehen – weniger als ein Prozent unseres Wasserstoffs wird bislang so produziert. Vor allem wegen der hohen Kosten. Diese werden nicht so schnell sinken. Daher ist abzusehen, dass Wasserstoff ein knappes und teures Gut bleiben wird, das möglichst sinnvoll eingesetzt werden muss.



Abbildung 1: Die umgekehrte Energiedichte nach Gewicht (oben) und nach Volumen (unten) ausgewählter Brennstoffe im Vergleich

Die obere Reihe zeigt die umgekehrte gravimetrische Energiedichte verschiedener Kraftstoffe, gemessen in Kilogramm pro Gigajoule (kg/GJ), die untere Reihe ihre umgekehrte volumetrische Energiedichte in Litern pro Gigajoule (l/GJ). Wasserstoff hat den höchsten Energiegehalt pro Gewichtseinheit. Im Vergleich zu flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Kerosin oder Benzin schneidet er jedoch hinsichtlich seines Platzbedarfs schlecht ab. Die angegebenen Volumina gehen von typischen Lagerbedingungen aus: komprimierter Wasserstoff bei etwa 700 bar, komprimiertes Erdgas bei ungefähr 250 bar und Benzin, Kerosin und Methanol als Flüssigkeiten bei Umgebungstemperatur.



Der Wasserstoff-Regenbogen

Wasserstoff kann auf verschiedene Arten hergestellt werden, die jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Um diese Produktionsverfahren zu unterscheiden, wird häufig eine farbbezogene Namenskonvention verwendet, die jedoch nicht standardisiert ist.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Menge an Treibhausgasemissionen, die bei der Wasserstoffproduktion über den gesamten Lebenszyklus hinweg entstehen. Einige Produktionsverfahren beinhalten die Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid. Wie in Abbildung 2 dargestellt, kann dies bei der Nutzung von Biomasse sogar zu negativen Emissionen führen – das heisst, dass der Atmosphäre insgesamt Kohlendioxid entzogen wird.

Derzeit werden fast die gesamten 97 Millionen Tonnen Wasserstoff, die weltweit produziert werden, aus fossilen Ressourcen gewonnen. Das führt zu jährlichen CO₂-Emissionen von rund 920 Millionen Tonnen.

Grün



«Grüner Wasserstoff» wird hergestellt, indem man erneuerbare Energie wie Wind- oder Sonnenenergie nutzt,

um Wasser (H₂O) durch Elektrolyse in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zu spalten. Dieser chemische Prozess wird Elektrolyse genannt und ist nahezu emissionsfrei. Die Hauptnachteile sind die vergleichsweise hohen Kosten, der erhebliche Wasser- und Stromverbrauch

sowie der damit verbundene hohe Bedarf an erneuerbaren Energien, sobald die Produktion von grünem Wasserstoff ausgebaut wird.

Gelb



«Gelber Wasserstoff» bezeichnet Wasserstoff, der durch Elektrolyse mit Elektrizität aus dem Stromnetz gewonnen

wird. Diese Methode ist zwar flexibel und kann die bestehende Strominfrastruktur nutzen, die dabei entstehende Menge an Treibhausgasen variiert jedoch je nach CO₂-Intensität des lokalen Stromnetzes. In Regionen, in denen viel Strom aus fossilen Brennstoffen wie Kohle oder Erdgas stammt, können erhebliche Emissionen entstehen und sogar diejenigen von grauem Wasserstoff übersteigen.

Türkis



«Türkiser Wasserstoff» wird durch die Umwandlung von Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff mittels Pyrolyse gewonnen. Bei der Pyrolyse handelt es sich um einen thermochemischen

Prozess, bei dem Methan unter Ausschluss von Sauerstoff in seine Bestandteile zerlegt wird. Wenn dieser Prozess mit erneuerbarer Energie betrieben wird und Methanleckagen entlang der Lieferkette kontrolliert werden, kann dies ein emissionsarmes Verfahren sein. Der feste Kohlenstoff, der als Nebenprodukt anfällt, kann dauerhaft gespeichert oder in industriellen Anwendungen verwendet werden (siehe Abbildung 3). Diese Technologie befindet sich jedoch noch in einem frühen Entwicklungsstadium und ist daher noch nicht kommerziell einsetzbar.

Rosa



«Rosa», «violetter» oder manchmal auch «roter Wasserstoff» wird durch Elektrolyse mit Strom aus Kernenergie hergestellt.

Dieses Verfahren bietet zwar geringe Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus, jedoch gibt es Bedenken hinsichtlich der radioaktiven Abfälle, der Sicherheitsrisiken und der hohen Kosten.

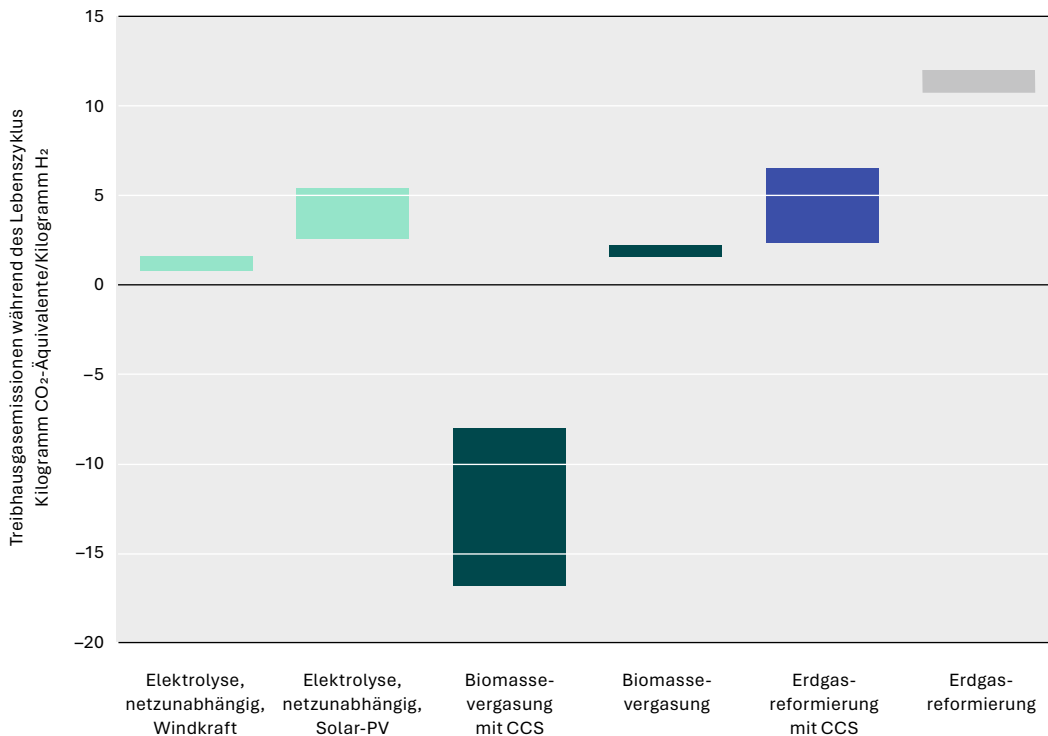


Abbildung 2: Mögliche Bandbreiten der Treibhausgasemissionen ausgewählter Verfahren zur Wasserstoffproduktion

Die Abbildung vergleicht die Treibhausgasemissionen verschiedener Verfahren zur Wasserstoffproduktion über den gesamten Lebenszyklus. Die Emissionen variieren dabei erheblich: Die Elektrolyse auf Basis von Wind- und Sonnenenergie («Grüner Wasserstoff») hat geringe Auswirkungen, während die Reformierung von Erdgas ohne Kohlenstoffabscheidung («Grauer Wasserstoff») die emissionsintensivste Option von allen hier gezeigten ist.

(Quelle: PSI-Labor für Energiesystemanalyse)

Grau



«Grauer Wasserstoff» stammt aus Dampfreformierung von Erdgas. Bei der Dampfreformierung wird Methan mit Wasser-

erdampf bei hohen Temperaturen zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Dies ist das kostengünstigste und etablierteste Herstellungsverfahren, das allerdings hohe CO₂-Emissionen verursacht (siehe Abbildung 2).

Schwarz/Braun



«Schwarzer» oder «brauner Wasserstoff» wird durch die Vergasung von Kohle gewonnen. Bei der Vergasung wird Kohle

unter begrenzter Sauerstoffzufuhr und hohen Temperaturen in ein Gasgemisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid umgewandelt. Dies ist eine der CO₂-intensivsten Methoden zur Wasserstoffherzeugung.

Umweltauswirkungen von Bohrungen und Veränderungen im Untergrund.

Wasserstoff aus Biomasse (noch keine Farbe)



Durch thermochemische oder biochemische Verfahren kann Wasserstoff auch aus Biomasse gewonnen werden. Die

mit der Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse verbundenen Treibhausgasemissionen variieren stark in Abhängigkeit des Ausgangsmaterials, der Auswirkungen der veränderten Landnutzung und der Frage, ob Kohlendioxid abgeschieden und gespeichert wird. In einigen Konstellationen, insbesondere bei der Verwendung von Bioabfällen mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung, kann dieses Verfahren zu negativen Emissionen führen: das in der Biomasse gebundene Kohlendioxid wird dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt. Allerdings können Nachhaltigkeitsbedenken den großflächigen Einsatz einschränken.

Blau



Wie grauer Wasserstoff wird «blauer Wasserstoff» durch Dampfreformierung von Erdgas hergestellt, jedoch mit CO₂-

Abscheidung und -Speicherung. Dieser Prozess kann den CO₂-Fussabdruck erheblich verringern und nutzt die bestehende Erdgasinfrastruktur. Ein Nachteil ist jedoch, dass die CO₂-Abscheidung und -Speicherung energieintensiv ist und nicht alle Emissionen beseitigt werden.

Weiss



«Weisser Wasserstoff» ist natürlich vorkommender Wasserstoff, der in unterirdischen Lagerstätten gefunden wird.

Die Nutzung von solchem Wasserstoff als natürlich vorkommende Ressource steckt noch in den Kinderschuhen. Es bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Grösse und Zugänglichkeit der globalen Vorkommen, der Wirtschaftlichkeit der Gewinnung und der möglichen

Es sind Prioritäten gefragt

Kohlenstoffarmer Wasserstoff wird in den kommenden Jahren knapp und teuer bleiben. Darum muss gut überlegt werden, wofür er eingesetzt wird.



Wasserstoff für Privatfahrzeuge? Wohl eher nicht. Für Ausflugsschiffe? Auch unwahrscheinlich. Zum Heizen unserer Häuser? Sicher nicht. Solche Anwendungsbereiche werden zwar oft genannt, sie ergeben aber bei Wasserstoff wenig Sinn. Und zwar, weil es effizientere, einfachere und günstigere Alternativen gibt, die ebenfalls fossile Energieträger ersetzen können. Bei Personenkraftwagen sind batterieelektrische Fahrzeuge sinnvoller und bei Heizungsanlagen elektrische Wärmepumpen, da sie den Strom direkt nutzen und Umwandlungsverluste dadurch

vermeiden. Ein Auto, das mit synthetischem Benzin aus Wasserstoff und CO₂ fährt, benötigt rund 5-mal mehr Strom als ein Elektroauto, eine mit synthetischem Erdgas betriebene Heizung 10-mal mehr als eine Wärmepumpe. Zudem sind Elektroautos und Wärmepumpen – über deren Lebensdauer betrachtet – heute schon kaum teurer als fossile Technologien.

Wenn diese Anwendungen also nicht sinnvoll sind, wozu dient der ganze grüne und blaue Wasserstoff in den Szenarien, in denen die Klimaschutzziele erfüllt werden? Zunächst muss der heutige

Wasserstoffbedarf von rund 100 Megatonnen pro Jahr gedeckt werden, in Erdölraffinerien, der chemischen Industrie und in der Düngemittelproduktion. Darüber hinaus gibt es bei vielen Anwendungen keine Alternativen zum Wasserstoff oder daraus hergestellten Energieträgern. Und diese unterscheiden sich wiederum darin, wie hoch die anfallenden Zusatzkosten sind und wie viel Treibhausgas eingespart werden kann.

Unsere Forschung zeigt, dass sich die grössten Einsparungen ergeben, wenn in der Stahlproduktion Kohle durch Was-

serstoff ersetzt wird. Auch bei der Herstellung von Ammoniak und Methanol lassen sich grosse Mengen CO₂ einsparen, wenn grüner Wasserstoff das heute genutzte Erdgas ersetzt. Ammoniak und Methanol eignen sich wiederum als Treibstoff für den globalen Schiffsverkehr, der heute mit Schweröl betrieben wird (siehe: «Dekarbonisierung der Schifffahrt»). Und schliesslich kann Wasserstoff überall dort, wo sehr hohe Temperaturen benötigt werden, Erdgas ersetzen und somit Treibhausgasemissionen reduzieren – zum Beispiel bei der Glasherstellung oder Metallverarbeitung.

Gemeinsames Merkmal all dieser Einsatzbereiche von Wasserstoff ist, dass bei ihnen Strom die fossilen Energieträger nur sehr beschränkt ersetzen kann.

Dies gilt auch bei einigen Anwendungen synthetischer Kohlenwasserstoffe aus Wasserstoff und CO₂ – allen voran beim Einsatz von synthetischem Kerosin als Flugtreibstoff (siehe: «Nachhaltige Flugtreibstoffe als Lösung im Flugverkehr?»). Hier existiert zumindest für kommerzielle Mittel- und Langstreckenflüge keine Alternative zu flüssigen Kohlenwasserstoffen, da diese die grösste Energiemenge speichern können.

In diesen Bereichen wird kaum ein Weg an Wasserstoff vorbeiführen. Zwar kann auch Biomasse beispielsweise zur Herstellung von Flugtreibstoff genutzt werden. Allerdings reicht die nachhaltige nutzbare Biomasse – vorzugsweise aus Bioabfällen wie Altöl oder Rückständen aus der Landwirtschaft – nicht aus, um

den Bedarf zu decken und Wasserstoff als klimafreundliche Alternative zu Erdgas, Kohle und Erdöl zu ersetzen.

Bei all den genannten sinnvollen Anwendungen stellt sich die entscheidende Frage, wie gross der Bedarf sein wird. Eines ist klar: Es handelt sich nicht bloss um Nischenanwendungen im kleinen Rahmen (siehe Abbildung 3). Im Gegenteil: Geht man vom heutigen Bedarf an Ammoniak, Methanol, Flugtreibstoffen, Hochtemperaturwärme und Stahl aus, so dürfte der künftige Verbrauch an Wasserstoff und dessen Derivaten deutlich über 100 Millionen Tonnen pro Jahr erreichen. Auch aus wirtschaftlicher Sicht ist es also sinnvoll, diese Anwendungen zu priorisieren.

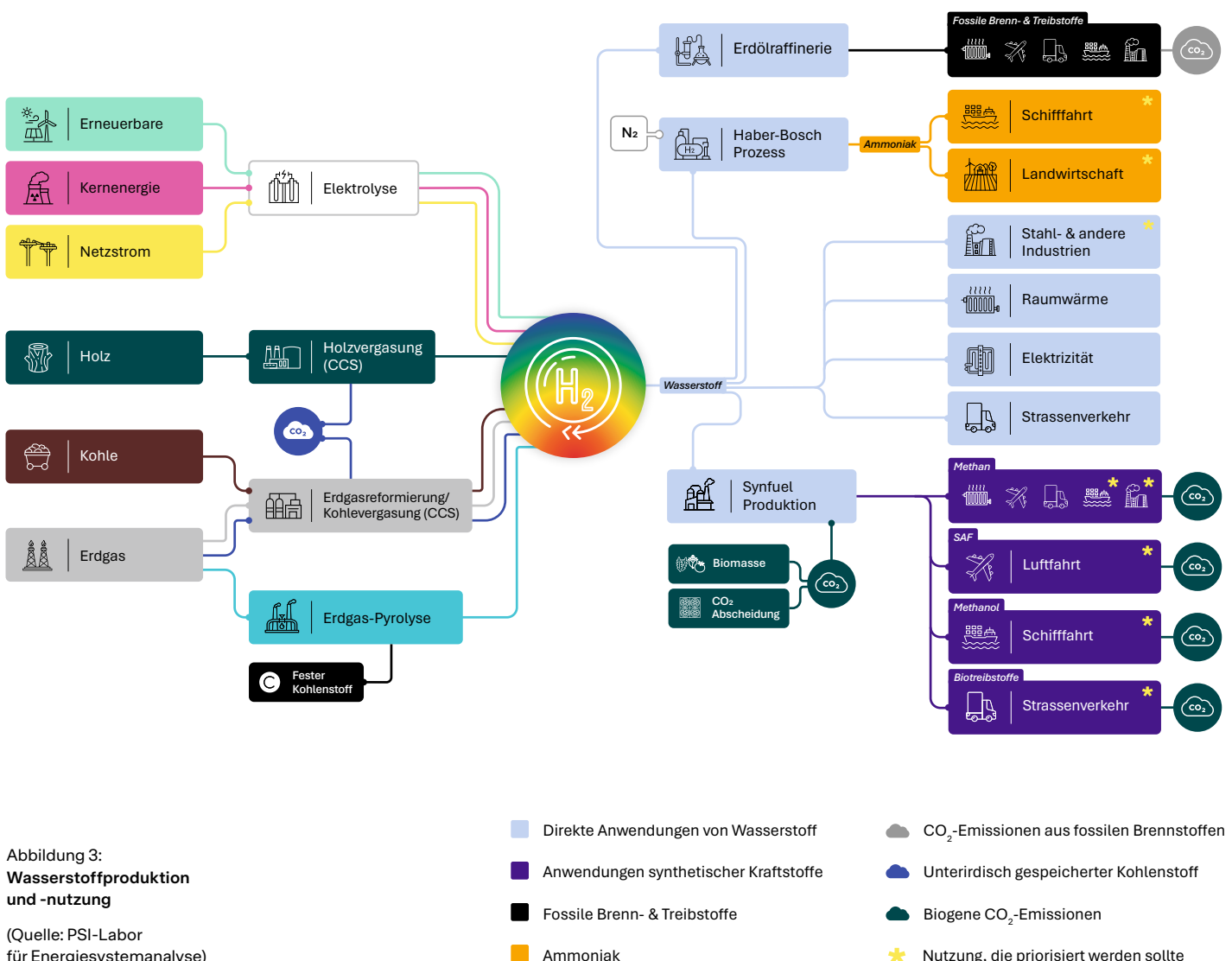


Abbildung 3:
Wasserstoffproduktion
und -nutzung

(Quelle: PSI-Labor
für Energiesystemanalyse)

Grüner Wasserstoff verlangt ökologische Kompromisse

Abbildung 4: So viel kostet heute die Produktion von grünem Wasserstoff an günstigen Standorten

Die Karte veranschaulicht die Regionen, in denen die Produktion von grünem Wasserstoff vergleichsweise kostengünstig ist, sowie den jeweiligen Grad der Wasserknappheit – von gering (grün) bis hoch (rot).

(Quelle: PSI-Labor für Energiesystemanalyse)

Von der Schwerindustrie und Landwirtschaft bis hin zur Schifffahrt und Luftfahrt – will man all diese Wirtschaftssektoren dekarbonisieren, steigert das die weltweite Wasserstoffnachfrage erheblich. Die Herstellung von grünem Wasserstoff benötigt jedoch grosse Mengen an Wasser, Materialien und Strom. Deshalb sind ökologische und wirtschaftliche Kompromisse notwendig.

Wasserstoff wird derzeit nicht in erster Linie als Energiequelle, sondern als Rohstoff in Öltraffinerien und in der chemischen Industrie zur Herstellung von Ammoniak, Düngemitteln und Methanol genutzt. Um die globale Erderwärmung zu begrenzen und fossile Brennstoffe zu ersetzen, wird jedoch kohlenstoffarmer Wasserstoff benötigt – vor allem in der Schwerindustrie, der Landwirtschaft, der Energiespeicherung und dem Fernverkehr. Dies wird wiederum zu einem weltweiten Anstieg der Nachfrage nach Wasserstoff führen. Dabei sollte der nötige Wasserstoff ausschliesslich mit Verfahren hergestellt werden, die geringe Treibhausgasemissionen verursachen.

Ausweitung der Produktion: Wo soll diese stattfinden?

Die Suche nach geeigneten Produktionsstandorten ist eine der Herausforderungen, die mit der Ausweitung der Produktion von grünem Wasserstoff verbunden sind. Denn für die Elektrolyse müssen ausreichend Land, reichlich Süsswasser und erneuerbarer Strom zur Verfügung stehen. Unsere globale Analyse zeigt, wo grüner Wasserstoff zu den niedrigsten Kosten produziert werden kann: in Südamerika, Australien, dem mittleren Westen der USA sowie in Wüstengebieten in Afrika und Asien. Aber selbst unter Be-

rücksichtigung von Standortoptimierung und technologischen Fortschritten wird es noch Jahrzehnte dauern, bis die Produktionskosten für grünen Wasserstoff auf das aktuelle Preisniveau von Wasserstoff aus fossilen Ressourcen sinken, wie wir im Artikel «Moleküle auf den Energiemärkten» näher erläutern.

Die standortspezifischen Kosten für Wasserstoff und daraus gewonnene kohlenstoffarme Energieträger hängen auch stark vom Investitionsrisiko eines Landes ab. Tatsächlich kann das Investitionsrisiko ein ebenso entscheidender Faktor sein wie die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Die Minderung der finanziellen Risiken, beispielsweise durch Subventionen und einheitliche Vorschriften, kann mehr Investitionen in Länder locken, die über vielversprechende Ressourcen verfügen aber ein hohes Investitionsrisiko aufweisen. Das gilt beispielsweise für einige Länder in Afrika.

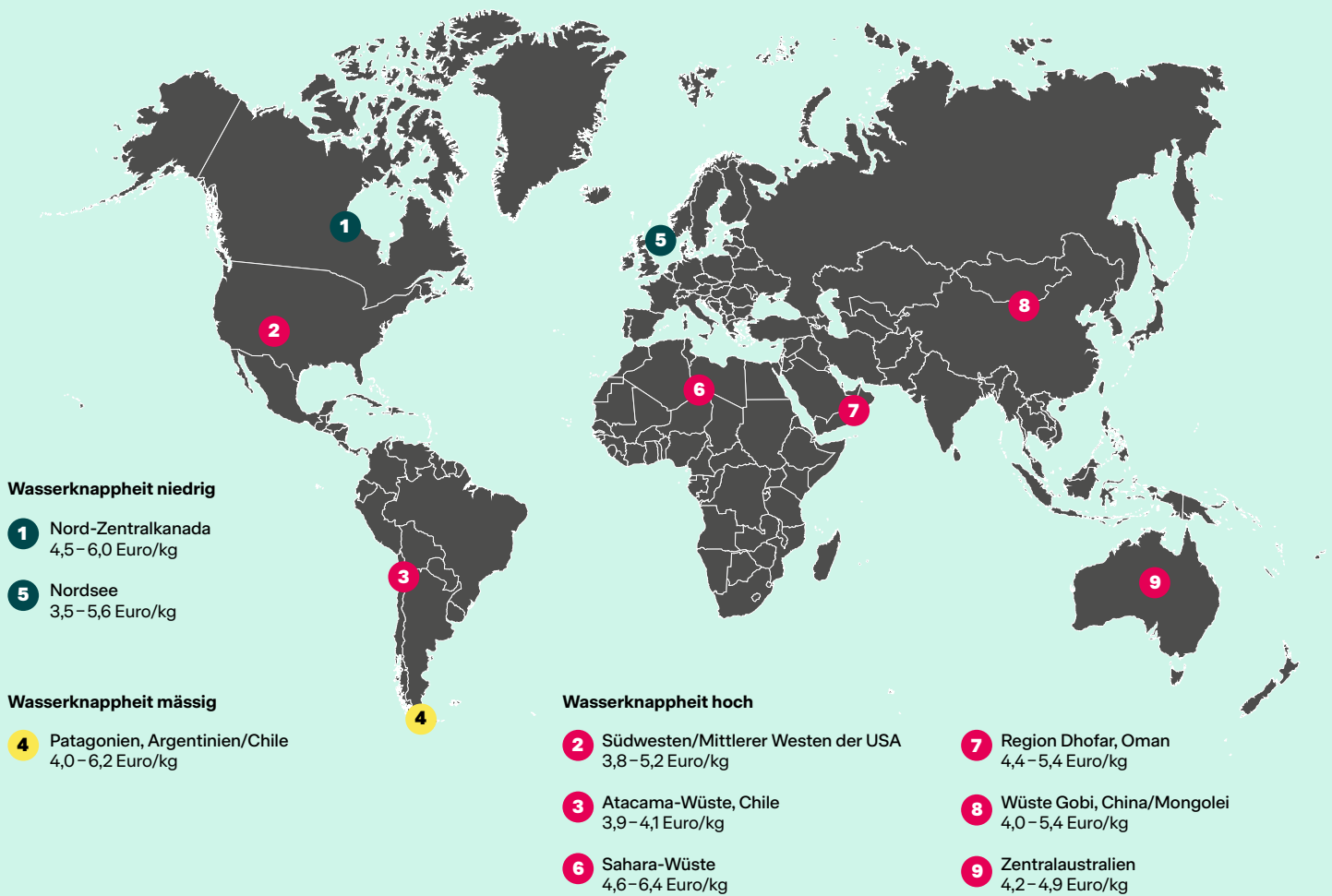
Chancen und Risiken abwägen

Obwohl die Produktion von grünem Wasserstoff nur geringe Treibhausgasemissionen verursacht, könnte eine Ausweitung dennoch mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden sein. Die Verfügbarkeit von Wasser ist hierbei eine Herausforderung, denn Elektrolyseure benötigen für die Wasserspaltung gereinigtes Wasser.

Mehr als 60 Prozent des von uns ermittelten globalen Potenzials für die Produktion von grünem Wasserstoff befinden sich in wasserarmen Gebieten (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus könnte der für die netzgebundene Wasserelektrolyse benötigte Strom die Stromnetze belasten, da zusätzliche erneuerbare Energiequellen erforderlich wären.

Auch die Nachfrage nach kritischen Materialien könnte zum Problem werden. Wasserstoff-Lieferketten sind häufig auf kritische Rohstoffe angewiesen – beispielsweise Iridium in einigen Elektrolyseuren und Seltene Erden für die Magnete in Windkraftanlagen. Die Beschaffung dieser Stoffe kann mit schwerwiegenden sozialen und ökologischen Problemen einhergehen, wie etwa schlechte Arbeitsbedingungen, die Zerstörung von Ökosystemen und Wasserverschmutzung durch den Abbau. Darüber hinaus konzentriert sich die Gewinnung und Aufbereitung dieser kritischen Rohstoffe in der Regel auf China und eine Handvoll anderer Länder, was zusätzliche Risiken für die Sicherheit der Lieferketten mit sich bringt.

Insgesamt erfordert die grossflächige Einführung von Wasserstoff und wasserstoffbasierten Kraftstoffen eine sorgfältige Abwägung wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien sowie die Festlegung von Prioritäten unter Berücksichtigung dieser Kompromisse.



Solarpark in Australien



Wasserstoff im Schweizer Energiesystem: Mehr als ein Energieträger

Molekulare Energieträger wie Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe werden eine strategische Rolle bei der Dekarbonisierung der Schweiz spielen. Unsere Szenarien zeigen, dass sie bis 2050 rund 15 Prozent des Energiebedarfs des Landes decken könnten – vor allem durch Importe.



Der Elektrolyseur auf der ESI-Plattform des PSI

Wasserstoff und synthetische Energieträger setzen sich zunehmend als wichtige Optionen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Luft- und Schifffahrt sowie der Schwerindustrie durch. Allerdings liegt ihr weltweiter Verbrauch derzeit noch unter einer Million Tonnen (Mt) pro Jahr. Dies entspricht lediglich einem Prozent des aktuellen weltweiten Ölbedarfs. Um die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, sollte der weltweite Verbrauch von kohlenstoffarmem Wasserstoff für Energiezwecke laut dem aktuellen Wasserstoffbericht der IEA bis 2030 44Mt und bis 2050 280Mt erreichen. Unsere Analyse zeigt, dass der

Verbrauch in der Schweiz bis 2050 bis zu 0,3Mt betragen könnte.

Die Ziele der Schweiz

Die EU hat Wasserstoff in den Mittelpunkt ihres Green Deals gestellt. Dabei sollen Vorschriften wie RefuelEU und FuelEU die Einführung von Treibstoffen aus grünem Wasserstoff für Flugzeuge und Schiffe vorantreiben. Im Einklang mit den europäischen Ambitionen hat die Schweiz im Jahr 2024 eine eigene Wasserstoffstrategie vorgelegt, deren Vision für klimaneutralen Wasserstoff im Einklang mit

den Nachhaltigkeitsvorschriften der EU steht. Im Gegensatz zur Strategie der EU enthält sie allerdings keine verbindlichen Ziele für die Produktion oder Nutzung und sieht kein spezifisches Budget für Wasserstoffprojekte vor. Unterstützt durch nationale Dekarbonisierungs- und Innovationsprogramme im Gesamtvolumen von 1,2 Milliarden Schweizer Franken im Rahmen des Klima- und Innovationsgesetzes (KiG) konzentriert sich die Schweiz auf die Entwicklung von «Wasserstoffclustern», die Vereinfachung der Regulierung und Investitionen unter Federführung der Industrie. Dennoch übernimmt sie aus der RefuelEU-Luftverkehrsverordnung die verbindlichen Vorgaben für die Beimischung von synthetischen Kraftstoffen.

Unsere Modellierungen von Energiesystemen und Szenarien zeigen, dass Wasserstoff in der Energiewende der Schweiz eine zweifache Rolle spielen kann:

- a) als sauberer Energieträger für Branchen, die sich nur schwer auf Strom umstellen lassen, wie die Zement-, Chemie- und Stahlindustrie, sowie für die Herstellung von synthetischem, nachhaltigem Flugtreibstoff für in der Schweiz betankte Flugzeuge,
- b) als saisonale Speicher für Stromnetze, um überschüssigen Strom aus dem Sommer für den Winter vorzuhalten.

Auf einem kosteneffizienten Weg zur Netto-Null erreicht der Wasserstoffverbrauch im Schweizer Energiesystem im

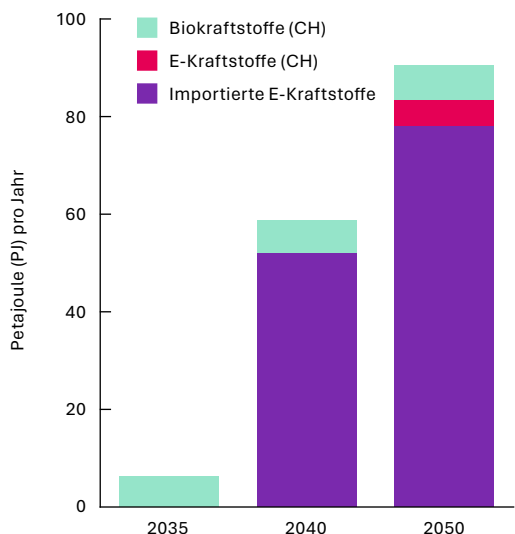


Abbildung 5: Inländische Versorgung und Importe nachhaltiger Energieträger in die Schweiz bis 2050

In unserem Netto-Null-Szenario bleibt die inländische Produktion nachhaltiger Biotreibstoffe und wasserstoffbasierter Energieträger begrenzt. Der grösste Teil der künftigen Versorgung wird voraussichtlich aus Importen stammen. Bis 2050 werden importierte Energieträger aus grünem Wasserstoff den Mix dominieren.

(Quelle: PSI-Labor für Energiesystemanalyse)

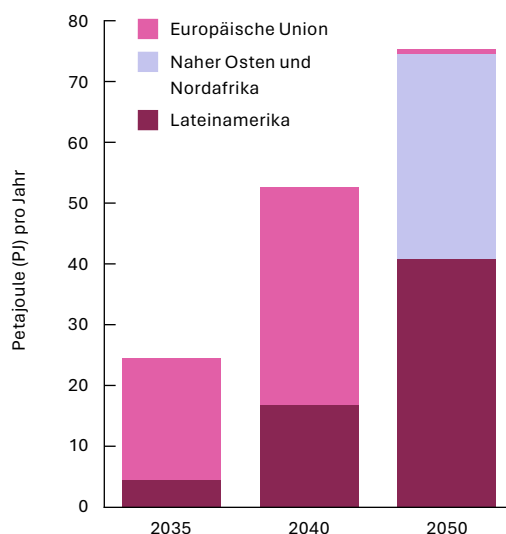


Abbildung 6: Schweizer Importe von Energieträgern aus grünem Wasserstoff nach Herkunft bis 2050

In unserem Netto-Null-Szenario wird ein starker Anstieg der Importe von nachhaltigen Energieträgern in die Schweiz prognostiziert, wobei die Europäische Union bis 2040 den Grossteil bereitstellen wird. Bis 2050 werden Lateinamerika, der Nahe Osten und Nordafrika zu wichtigen Exporteuren.

(Quelle: PSI-Labor für Energiesystemanalyse)

Jahr 2050 zwischen 0,2 und 0,3Mt oder 24 und 26 Petajoule (PJ). Darüber hinaus werden der Luftverkehr und die industrielle Wärmeversorgung im Jahr 2050 etwa 90PJ (hauptsächlich importierte) synthetische Brennstoffe benötigen (siehe Abbildung 5). Davon entfallen allein 65PJ auf nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuel, SAF) (mehr dazu in «Nachhaltige Flugtreibstoffe als Lösung im Flugverkehr?»). Der saisonale Speicherbedarf in der Schweiz könnte unterdessen 5 bis 7PJ erreichen. Der Schweizer Energieversorger Gaznat plant den Bau von ausgekleideten Felskavernen im Oberwallis mit einer Kapazität von 5,5PJ. Zum Vergleich: Dies entspricht 4 Prozent des aktuellen jährlichen Erdgasverbrauchs der Schweiz.

Würde man Wasserstoff und daraus hergestellte Energieträger – ohne Berücksichtigung des internationalen Luftverkehrs – aus dem Energiemix der Schweiz ausschliessen, würden sich die jährlichen Systemkosten für die nächsten 25 Jahre um 200 Schweizer Franken pro Kopf erhöhen (d. h. insgesamt rund 5000 Schweizer Franken pro Kopf von 2025 bis 2050) und die Dekarbonisierung würde erschwert werden.

Ausweitung von Pilotprojekten

Aktuell ist die Wasserstoffproduktion in der Schweiz minimal. Die Kapazität der installierten Elektrolyseure beträgt etwa 11 Megawatt und ist auf kleine Projekte in Dietikon, Reichenau, Uri und Gruyère verteilt. Die derzeitige inländische Wasserstoffproduktion liegt weit unter zehntausend Tonnen pro Jahr. Mit Blick auf die Zukunft zeigen unsere Modellrechnungen, dass die inländische Produktion durch Elektrolyse bis zum Jahr 2050 0,2Mt pro Jahr erreichen könnte. Die Biomassevergasung oder Methanreformierung mit Kohlenstoffabscheidung birgt ein zusätzliches Potenzial von 0,1Mt pro Jahr. Um diese Mengen zu erreichen, wären allein für die Produktionsinfrastruktur Investitionen in Höhe von schätzungsweise 22 Milliarden Schweizer Franken erforderlich. Diese Ergebnisse unterstreichen das Ausmass der Herausforderung und die Bedeutung klarer langfristiger politischer Signale.

Selbst bei einem hohen inländischen Anteil würden über 90 Prozent des Wasserstoffs und aller daraus hergestellten Energieträger importiert werden –

hauptsächlich aus Nordafrika, dem Nahen Osten und Lateinamerika (Abbildung 6). Dies unterstreicht die Bedeutung der Verbindungen der Schweiz zur europäischen Infrastruktur, beispielsweise durch langfristige Importverträge, um die Kosten stabil zu halten und die Versorgung zu sichern, sowie zu Projekten wie dem European Hydrogen Backbone, einer Initiative europäischer Gasfernleitungsbetreiber zum Aufbau einer speziellen Wasserstofftransportinfrastruktur in ganz Europa.

Treibstoffe aus grünem Wasserstoff sind nicht nur Energieträger – sie verbinden unterschiedliche Sektoren, stärken die Robustheit der Schweizer Energieversorgung und tragen zur Sicherung einer klimaneutralen Zukunft bei. Um ein wasserstoffbasiertes System vorzubereiten und ihre Netto-Null-Ziele rechtzeitig zu erreichen, muss die Schweiz grenzüberschreitende Verbindungen aufbauen, Importpartnerschaften sichern und Investoren klare, langfristige Signale senden. Um weniger flexible und teurere Transformationspfade zu vermeiden, müssen diese Schritte jetzt unternommen werden.



Auf dem Spielfeld der Energiemärkte

Märkte, Technologie und Eigentumsverhältnisse werden die Rolle von Wasserstoff in einem Netto-Null-System prägen – und damit auch die Energiezukunft der Schweiz.

Um Wasserstoff als gängigen Energieträger zu etablieren, bedarf es eines umfassenden Systems aus Pipelines, Speichern und Handelsplätzen – ähnlich den Strukturen, auf denen die heutigen Erdgasmärkte beruhen. Im Gegensatz zu Erdgas verfügt Wasserstoff jedoch bislang über kein eigenes Netz und keine Handelsplätze. Daher wird er in der Regel kostspielig durch Lastwagen ausgeliefert. Der Wasserstoffmarkt ist nach wie vor klein. Laut HYDRIX, einem 2023 in

Deutschland eingeführten Wasserstoffindex, liegen die Preise im Einzelhandel relativ hoch, bei 8 bis 10 Schweizer Franken pro Kilogramm Wasserstoff. Dies entspricht etwa fünf Schweizer Franken an der Zapfsäule für Benzin bei äquivalentem Energiegehalt (und der Annahme ähnlicher Steuerbelastung wie für Benzin). Aufgrund der hohen Kosten und der fehlenden speziellen Infrastruktur wird die Nutzung des Erdgasnetzes als attraktive Alternative betrachtet.

Herausforderungen bei der Beimischung und dem Transport von Wasserstoff

Einige Länder haben bereits versuchsweise geringe Mengen Wasserstoff in das Erdgasnetz eingespeist. In der Regel können bis zu 15 Volumenprozent ohne grössere technische Probleme beigemischt werden. Höhere Anteile sind zwar möglich, würden allerdings Anpassungen an Ventilen, Rohrleitungen und Geräten notwendig machen. Und da die Wasserstoffproduktion aus Solar- und Windenergie tendenziell schwankt, würde das resultierende Mischungsverhältnis zeitlich variieren, was sowohl die Sicherheit als auch die Zuverlässigkeit beeinträchtigen könnte. Daher sind viele Experten der Meinung, Wasserstoff benötige langfristig eine eigene Infrastruktur, wenn er eine bedeutsame Rolle im Energiesystem spielen soll.

Wasserstoffspeicherung: tägliche und saisonale Nutzung

Ein Vorteil von Wasserstoff ist, dass sich der Energieträger für die spätere Ver-



wendung speichern lässt – über Stunden, Tage oder sogar Monate. Dadurch lässt er sich potenziell für den Ausgleich von schwankender erneuerbarer Energie aus Sonne und Wind nutzen.

Diese Speicherung ist jedoch mit Kosten verbunden. Bei der wasserstoffbasierten, sogenannten «Power-to-Power» (P2P)-Speicherung wird Strom durch Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt, gespeichert und später mithilfe einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt. Dieser Prozess ist teuer und mit Kosten zwischen 330 und 500 Schweizer Franken pro Megawattstunde gelieferter Elektrizität verbunden und liegt damit weit über den heutigen Strompreisschwankungen zwischen Tag und Nacht. Um wettbewerbsfähig zu werden, sind Kostensenkungen wie bei PV-Modulen und eine verbesserte Effizienz erforderlich. Zur Deckung der täglichen Speicherkosten sind andere Systeme, wie Pumpspeicherkraftwerke und Batterien, derzeit kostengünstiger.

In einem Bereich könnte Wasserstoff einen Kostenvorteil bieten – bei der saisonalen Speicherung. Die Lagerung von Wasserstoff in Tanks oder unterirdischen

Hohlräumen über Wochen oder Monate hinweg könnte sich als wirtschaftlicher erweisen als der Einsatz von Batterien oder Pumpspeichern über ähnliche Zeiträume. Allerdings verfügt die Schweiz derzeit über keine nennenswerten eigenen Gaslagerkapazitäten. Aktuell werden drei Terawattstunden Erdgas-Speicherkapazität in der EU (hauptsächlich in Frankreich) genutzt und selbst aus technischer Sicht ist die Umstellung auf Wasserstoffspeicherung nicht gesichert. Ohne den Bau von Wasserstoffspeichern kann Wasserstoff die nötige Flexibilität nur eingeschränkt bieten. Für eine praktikable saisonale Speicherlösung auf Wasserstoffbasis sind dagegen stärkere saisonale Strompreissignale als bisher nötig, oder es bedarf politischer Förderung, um die Importabhängigkeit im Winter zu verringern und die Energiesicherheit zu verbessern.

Wem sollte die Infrastruktur gehören?

Auch die Eigentumsverhältnisse bei Elektrolyseuren und Speicheranlagen können die Marktentwicklung beeinflussen. Ein grosser Akteur, der einen wesentlichen Teil des Marktes kontrolliert, könnte Angebot und Nachfrage manipulieren und so die Preise beeinflussen – man spricht hier von Marktmacht.

Elektrolyseure verbrauchen Strom und befinden sich meist im Besitz von Energieversorgern, die auch Strom erzeugen. Ist ein solcher Energieversorger gross genug, kann er sowohl Angebot als auch Nachfrage beeinflussen und die Strompreise zu seinen Gunsten steuern. Somit kann er Marktmacht ausüben.

In einem vereinfachten Modell haben wir den Fall untersucht, in dem sowohl ein einzelner Stromerzeuger als auch ein einzelner Elektrolyseurbetreiber beide über Marktmacht verfügen. Wenn beide Unternehmen demselben Eigentümer gehören, verbessert sich der gesamtwirtschaftliche Nutzen – also der Gesamtnutzen für Produzenten und Verbraucher, der sich aus der Differenz zwischen den Marktpreisen und den tatsächlichen Kosten des Systems ergibt –, jedoch nur so lange die Elektrolyseurkapazität einigermaßen gering bleibt, wie derzeit der Fall.

Bei zunehmender Grösse der Elektrolyseure führt eine Trennung der Eigentumsverhältnisse jedoch tendenziell zu einer Verbesserung des Gesamtnutzens.

Diese Ergebnisse zeigen, wie sich die Verteilung der Kapazität und der Eigentumsverhältnisse auf die Marktmacht auswirken kann. Sie deuten auch darauf hin, dass die optimale Marktgestaltung von der Grösse der grünen Wasserstoffproduktion im Verhältnis zur Stromversorgung abhängen kann. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Risikoaversion – also die Bevorzugung stabiler, vorhersehbarer Erträge gegenüber dem Risiko ungewisser zukünftiger Höchststände, die auch Verluste mit sich bringen könnten. Besonders in volatilen Energiemärkten könnten Unternehmen stabile Renditen einer Gewinnmaximierung vorziehen. Anders ausgedrückt: Risikoscheue Unternehmen wollen ihren durchschnittlichen Gewinn maximieren und das Risiko geringer Gewinne begrenzen. Unser Modell zeigt: in einem solchen Szenario, bei dem die Speicherung durch einen Energieverbraucher (statt eines Produzenten) erfolgt, nutzt das System die Speicherung tendenziell besser, was zu einem höheren gesamtwirtschaftlichen Nutzen führt. Durch eine gut konzipierte Aufteilung der Erträge lassen sich die Anreize für unterschiedliche Eigentümer jedoch aufeinander abstimmen.

Ausblick

Neben der potenziellen heimischen Produktion synthetischer Energieträger wie nachhaltiger Flugtreibstoffe hängt die Rolle von Wasserstoff in der Schweiz von der saisonalen Speicherung ab. Um einen gut funktionierenden Wasserstoffmarkt in der Zukunft zu gewährleisten, sind die Eigentumsverhältnisse von Elektrolyseuren und Wasserstoffspeichern entscheidend. Gleichzeitig müssen Marktregeln verhindern, dass grosse Akteure die Preise verzerren, und sicherstellen, dass auch risikoscheue Unternehmen die Speicherkapazitäten voll ausnutzen.

Nachhaltige Flugtreibstoffe als Lösung im Flugverkehr?

Klimaneutral bis 2050 – viele Fluggesellschaften haben sich dieses Ziel gesetzt. Um es zu erreichen, spielen nachhaltige Flugtreibstoffe aus Wasserstoff eine wichtige Rolle. Den Treibstoff zu wechseln, wird aber nicht genügen.

Die Verringerung der Klimaauswirkungen durch die Luftfahrt stellt eine besondere Herausforderung dar. Im Gegensatz zu anderen Bereichen ist die direkte Elektrifizierung der meisten Flugzeuge nicht möglich. Während Batterieantriebe in Autos gut funktionieren, sind die für Flugzeuge benötigten Batterien zu schwer, insbesondere auf längeren Strecken. Und anders als bei Lastwagen sind in naher Zukunft auch keine mit Wasserstoff betriebenen Flugzeuge geplant. Das liegt vor allem an der geringen volumenbezogenen Energiedichte von Wasserstoff (siehe Abbildung 1). Dazu müssten die Flugzeuge entweder komplett neu konstruiert werden, oder die Anzahl der Sitzplätze müsste erheblich verringert werden.

Nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) sind dagegen eine plausible Alternative zu herkömmlichem Kerosin. SAF ist eine zertifizierte Treibstoffklasse, die entweder aus Biomasse (bioSAF) oder aus einer Mischung aus Wasserstoff und nicht fossilem Kohlendioxid (synthetischer SAF) hergestellt wird und die klimawirksamen CO₂-Emissionen massiv reduziert. Sowohl bioSAF als auch synthetischer SAF spielen eine zentrale Rolle in der 2023 in Kraft getretenen Beimischungsverpflichtung der Europäischen Union. Diese schreibt vor, dass Flugtreibstoff bis 2050 mindestens zu 70 Prozent aus SAF bestehen muss, wovon die Hälfte synthetischer SAF sein sollte.

Komplexer als es scheint

Auf den ersten Blick scheint synthetischer Flugtreibstoff eine elegante Lösung für das Klimaproblem des Luftverkehrs zu sein. Die Forschungsergebnisse unseres Labors zeichnen jedoch ein komplexeres Bild.

Zwar kann synthetischer SAF die fossilen CO₂-Emissionen drastisch reduzieren, doch sind zwei Drittel der heutigen Erwärmungseffekte des Luftverkehrs auf sogenannte «Nicht-CO₂-Effekte» zurückzuführen. Das sind Klimaauswirkungen, die durch andere Prozesse und Emissionen als Kohlendioxid verursacht werden. Dazu gehören die Bildung von Kondensstreifen und Zirkuswolken, Stickoxidemissionen und Wasserdampf in grosser Höhe, die alle zur Erderwärmung beitragen.

Synthetischer SAF verbrennt zwar sauberer als Kerosin, wodurch sich weniger Kondensstreifen bilden. Der wachsende Flugverkehr schmälert jedoch die Klimavorteile. Bei einem anhaltenden Anstieg des Flugverkehrs würden Nicht-CO₂-Effekte auch in Zukunft über 50 Prozent der gesamten luftfahrtbedingten Klimaauswirkungen verursachen. Auch wenn diese Nicht-CO₂-Effekte oft nur von kurzer Dauer sind, bedeutet mehr Flugverkehr auch mehr Nicht-CO₂-Effekte, was letztlich zu einer anhaltenden Klimaerwärmung führt. Mit anderen Worten: Nicht-CO₂-Effekte lassen sich nicht allein durch einen Wechsel des Flugtreibstoffs

vermeiden; wir müssen auch weniger fliegen und Flugzeuge umleiten, um die Bildung von Kondensstreifen zu reduzieren.

Weiter verschärft wird die Lage durch den enormen Energie- und Ressourcenbedarf, der für die Herstellung der benötigten Menge an synthetischem SAF erforderlich ist. Würde der europäische Bedarf an Flugtreibstoff ausschliesslich mit synthetischem SAF gedeckt, würde sich bei der aktuellen Wachstumsrate des Flugverkehrs der Strombedarf Europas in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts verdoppeln. Selbst wenn durch die Beimischung von Bio-SAF weniger synthetischer SAF nötig wäre, bliebe die verbleibende Menge eine enorme Herausforderung.

Darüber hinaus brauchen wir Technologien wie die direkte Luftabscheidung und -speicherung von CO₂ (DACCS), oder





vergleichbare Verfahren, um CO₂ aus der Atmosphäre zu binden und die anhaltenden Erwärmungseffekte durch die Nutzung von SAF zu kompensieren. DACCS ist ausserdem ein energieintensiver Prozess, der nicht nur zusätzliche klimaneutrale Energie, sondern auch eine umfangreiche geologische CO₂-Speicherinfrastruktur erfordert, die noch nicht vorhanden ist.

Notwendig, aber nicht ausreichend

Zweifellos ist synthetischer SAF ein wertvoller Baustein im Puzzle der Dekarbonisierung der Luftfahrt. Er bietet Kompatibilität, geringe fossile CO₂-Emissionen und eine moderate Verringerung der Nicht-CO₂-Effekte.

Solche nachhaltigen Flugtreibstoffe sind allerdings kein Allheilmittel. Unsere Untersuchungen zeigen eindeutig, dass SAF als Ersatz für Kerosin nicht ausreichen wird, um das Fliegen wirklich klimaneutral zu machen.

Weitere Alternativen zur Minderung der Klimaauswirkungen des Flugverkehrs sind neue Flugzeugkonstruktionen, verbesserte Triebwerke (insbesondere zur Reduzierung von Stickoxiden) und marktwirtschaftliche Massnahmen zur Eindämmung der Nachfrage. Letztendlich wird klimaneutrales Fliegen für die Passagiere mit höheren Kosten verbunden sein – und mit weniger Flugreisen.

4,78 Milliarden

Fluggäste weltweit
im Jahr 2024

12,4 Milliarden

Weltweit erwartete Fluggäste
im Jahr 2050

(Quellen: IATA und ICAO)

«Die Dekarbonisierung stellt die Luftfahrt vor erhebliche Herausforderungen.»

Ramon Hess

Ein Gespräch mit Ramon Hess und Gabriel Müller von Swiss International Air Lines

Der Flugverkehr nimmt seit dem Höhepunkt der Coronavirus-Pandemie wieder stark zu – gleichzeitig hat sich die Luftfahrtbranche zur Reduktion der von ihr verursachten negativen Umweltwirkung verpflichtet. Wie passt das zusammen?

Gabriel Müller: Ja, der Flugverkehr nimmt wieder zu – das zeigt, wie wichtig Mobilität für unsere Gesellschaft ist. Gleichzeitig ist uns bewusst, dass wir als Branche eine Verantwortung tragen, unsere Umweltwirkung deutlich zu reduzieren. Die Transformation hin zu einem nachhaltigeren Luftverkehr ist mit massiven Herausforderungen verbunden. Bei SWISS verfolgen wir ambitionierte CO₂-Ziele und setzen auf eine Vielzahl an Hebeln und Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Flugbetrieb. Wir haben uns auf den Weg gemacht, befinden uns aber noch am Anfang der Reise in Richtung nachhaltiger Luftverkehr.

Auch SWISS hat sich Netto-Null-CO₂-Emissionen bis 2050 zum Ziel gesetzt. Wie soll das konkret funktionieren?

Ramon Hess: Genau, Gabriel hat eben schon angedeutet, dass wir bei SWISS verschiedene Ansätze verfolgen, um

unsere CO₂-Emissionen zu reduzieren. Ein zentraler Hebel ist unsere Flotte: Moderne Flugzeuge wie der A320neo oder der A350 verbrauchen deutlich weniger Treibstoff als ihre Vorgänger-

befinden, ist ihre gezielte Förderung bereits heute essenziell.

Neben der Reduktion durch SAF ist die Entfernung der verbleibenden CO₂-Emissionen aus der Luft ein unverzicht-

«Derzeit reicht die globale Produktionskapazität von SAF für etwa 0,7 Prozent des weltweiten Bedarfs.»

Gabriel Müller

modelle. Weiter setzen wir auf Massnahmen zur Steigerung der Effizienz im täglichen Flugbetrieb. Dies beispielsweise durch optimierte Anflugverfahren oder digitale Entscheidungshilfen und Optimierungen zur Einsparung von Treibstoff.

Der Schlüssel zur Dekarbonisierung liegt in der Förderung und Nutzung von nachhaltigen Flugtreibstoffen («Sustainable Aviation Fuels», SAF), etwa durch gezielte Partnerschaften mit Technologiepionieren wie Synhelion. Da sich viele Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Luftfahrt noch in der Entwicklung oder frühen Skalierung

barer Bestandteil unserer Strategie zu Netto-Null-CO₂-Emissionen, aber auch der Strategie des ganzen Sektors.

Auch Wasserstoff wird als möglicher Flugtreibstoff diskutiert – sehen Sie realistische Einsatzmöglichkeiten bei einer Airline wie SWISS, oder bleibt der Fokus auf synthetischen Kohlenwasserstoffen?

RH: Wasserstoff wird zu Recht als vielversprechender Treibstoff für die Luftfahrt diskutiert – dies allerdings insbesondere für kleinere Flugzeuge

und Kurzstrecken in der Zukunft. Langstreckenflugzeuge, die den Grossteil der CO₂-Emissionen verursachen, werden – Stand heute – auch im Jahr 2050 noch mit flüssigem Treibstoff betrieben werden. Einen direkten Einsatz von Wasserstoff sehen wir mittelfristig als wenig realistisch. Unser Fokus liegt daher klar auf synthetischen Kohlenwasserstoffen, also SAF, die mit grünem Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden. Diese sind mit der bestehenden Flotte und Infrastruktur kompatibel und bieten eine skalierbare Lösung zur Dekarbonisierung der Luftfahrt.

Welche Herausforderungen sehen Sie beim Umstieg auf nachhaltige Flugtreibstoffe?

GM: Eine der grössten Herausforderungen beim Umstieg auf nachhaltige

«Der Schlüssel zur Dekarbonisierung liegt in der Förderung und Nutzung von nachhaltigen Flugtreibstoffen.»

Ramon Hess

Flugtreibstoffe ist die Verfügbarkeit. Derzeit reicht die globale Produktionskapazität von SAF nur für etwa 0,7 Prozent des weltweiten Bedarfs und synthetische Treibstoffe sind noch nicht kommerziell verfügbar.

RH: Hinzu kommen hohe Kosten. Biogene SAF sind aktuell drei- bis fünfmal teurer als fossiles Kerosin, synthetische SAF sogar bis zu zehnmals. Bereits heute machen die Treibstoffkosten

rund 30 Prozent der Betriebskosten einer Airline aus. Für Fluggesellschaften ist eine breite Anwendung von SAF aktuell wirtschaftlich nicht tragbar, weshalb es dringend internationale Förderkonzepte braucht. Nur wenn Produktion, Technologieentwicklung und Nachfrage gemeinsam vorangetrieben werden, kann der Umstieg gelingen.

Wie sehen Sie die Zahlungsbereitschaft der Kunden und Kundinnen für nachhaltigeres Fliegen?

GM: Wir beobachten ein wachsendes Interesse an nachhaltigerem Fliegen – und gerade die Beiträge unserer Kundinnen und Kunden sind zentral für die Transformation des Luftverkehrs. Momentan wählen etwa 5 Prozent unserer Passagiere eines unserer Angebote, um ihre Flugreise nachhaltiger zu gestalten. In den Premium-Klassen ist die Zahlungsbereitschaft deutlich höher.

Neben Treibhausgasen spielen auch Nicht-CO₂-Effekte wie Kondensstreifen eine Rolle beim Klimaeffekt der Luftfahrt. Wie geht SWISS mit diesem Thema um?

RH: SWISS ist sich bewusst, dass sich die Gesamtauswirkungen des Luftverkehrs auf das Klima nicht nur auf die Wirkung von CO₂ beschränken. Das Ausmass der Nicht-CO₂-Effekte ist noch Gegenstand laufender Forschung, deshalb unterstützen wir gezielt Forschungsprojekte, die diese Effekte sowie mögliche Minderungsmaßnahmen untersuchen. Und wie bereits erwähnt fördern wir die Nutzung von SAF, die weniger Aromaten und einen



Ramon Hess

ist Corporate Responsibility Manager bei Swiss International Air Lines. Zu seinem Verantwortungsbereich gehören die Überwachung und Steuerung der CO₂-Roadmap, die Einhaltung von Umweltvorgaben und der Aufbau strategischer Partnerschaften zur CO₂-Entfernung.



Gabriel Müller

ist seit 10 Jahren bei Swiss International Air Lines in verschiedenen Funktionen tätig. Seit 2022 treibt er im Nachhaltigkeitsteam insbesondere die Entwicklung und Markteinführung von nachhaltigen Treibstoffen, die Kundenangebote für nachhaltigeres Fliegen sowie verschiedene strategische Partnerschaften voran.

geringeren Schwefelgehalt aufweisen. Bei der Verbrennung entstehen dadurch weniger Russpartikel und Aerosole, was die Bildung von Kondensstreifen reduzieren kann. SAF können entsprechend einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte leisten.

Politische Massnahmen wie Quoten für SAF oder eine Kerosinsteuer werden kontrovers diskutiert. Welche Art von Regulierung erachten Sie als sinnvoll, um eine nachhaltigere Luftfahrt zu fördern? Sind die ambitionierten europäischen Ziele für SAF realistisch?

RH: Politische Massnahmen müssen international – idealerweise global – abgestimmt und wettbewerbsneutral ausgestaltet sein. Nur dann können klimapolitische Instrumente Wirkung zeigen und Carbon Leakage, das heisst die Verlagerung von Verkehrsströmen und CO₂-Emissionen ins Ausland, vermieden werden. Während nationale Instrumente keineswegs zielführend sind, entstehen auch beispielsweise beim SAF-Mandat im Rahmen von ReFuelEU Aviation Wettbewerbsverzerrungen. Die Beimischquote verteuert Verbindungen über europäische Drehkreuze und führt zu Wettbewerbsnachteilen sowie Emissionsverlagerung. Dies unterstreicht die Bedeutung einer international abgestimmten klimapolitischen Gesetzgebung sowie die Herausforderungen bei der Entwicklung wirksamer Instrumente für den Luftverkehr.

GM: Ob Unternehmen und Politik ihre Nachhaltigkeitsziele erreichen, hängt auch von fairen globalen Wettbewerbsbedingungen ab. Dafür braucht es eine wettbewerbsneutrale Anpassung der Regulierung – etwa durch eine endzielbezogene Passagierabgabe in der EU, deren Einnahmen für SAF genutzt werden könnten. Gleichzeitig braucht

es eine Förderstrategie für SAF. Die Produktion nachhaltiger Treibstoffe muss rasch skaliert werden, um die Verfügbarkeit der notwendigen Mengen zu wettbewerbsfähigen Preisen sicherzustellen.

Kooperationen sind bei einem komplexen Thema wie der CO₂-neutralen Luftfahrt zentral. Welche Partnerschaften verfolgt SWISS, um ihr Netto-Null-Ziel zu erreichen?

RH: Wir arbeiten mit Flughäfen, Treibstoffproduzenten, Forschungseinrichtungen und Technologiepartnern zusammen, um konkrete Lösungen zu entwickeln und zu skalieren. Dazu zählen etwa Projekte zur Optimierung von Flugverfahren, zur Einführung von SAF oder zur CO₂-Entfernung. Wir sind sehr

Wir prüfen kontinuierlich weitere Partnerschaften, um unser Portfolio gezielt zu erweitern. 2025 ist beispielsweise eine Kooperation mit neustark hinzugekommen – einem Schweizer Unternehmen, das CO₂ dauerhaft in Recyclingbeton speichert.

Die Luftfahrt steht immer wieder in der Kritik, gerade im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern. Was sagen Sie dazu, dass «weniger Fliegen» die wirksamste Massnahme wäre?

GM: Mobilität ist für viele Menschen und Unternehmen unverzichtbar, ermöglicht weltweiten Austausch und Handel. Eine Welt ohne Luftverkehr ist heute nicht mehr denkbar. Unser Ziel ist es daher, das Fliegen nachhaltiger zu gestalten.

«Die Produktion nachhaltiger Treibstoffe muss rasch skaliert werden, um die Verfügbarkeit der notwendigen Mengen zu wettbewerbsfähigen Preisen sicherzustellen.»

Gabriel Müller

stolz auf unsere Partnerschaften mit den beiden Schweizer Pionierunternehmen Synhelion und Climeworks. Gemeinsam fördern wir Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Luftfahrt.

Auch in Bezug auf die Steigerung der Effizienz im täglichen Flugbetrieb sind Kooperationen wichtig. Gemeinsam mit Google hat SWISS beispielsweise eine auf der Google-Cloud-Technologie basierende Plattform für eine bessere Planung und Steuerung ihres täglichen Flugbetriebs entwickelt. Dies führt zu signifikanten Treibstoffeinsparungen.

Wir setzen auf Transparenz und bieten unseren Kundinnen und Kunden konkrete Möglichkeiten, ihre flugbezogenen CO₂-Emissionen zu reduzieren.

RH: Die Dekarbonisierung stellt die Luftfahrt vor erhebliche Herausforderungen. Eines steht fest: Für CO₂-Reduktionsmassnahmen braucht es Zusammenarbeit – mit Start-ups, der Wissenschaft und den Kundinnen und Kunden.



Dekarbonisierung der Schifffahrt

Die Schifffahrt ist aufgrund ihrer riesigen Schiffe, ihres immensen Kraftstoffbedarfs und ihrer globalen Infrastruktur ein schwieriger Sektor für die Dekarbonisierung. Während die Branche nach nachhaltigen Alternativen zu Schweröl sucht, entsteht eine neue Generation von strombasierten Treibstoffen wie «E-Ammoniak» und «E-Methanol». Jeder dieser synthetischen Treibstoffe hat seine eigenen technischen und ökologischen Vor- und Nachteile.

Der Weg zu Netto-Null-Treibhausgasemissionen im wachsenden Schifffahrtssektor ist alles andere als klar. Es werden immense Mengen an Energie benötigt, um riesige Schiffe über lange Strecken ohne Tankmöglichkeiten anzutreiben. Derzeit werden die meisten Schiffe weltweit mit schwefelarmem Schweröl betrieben. Wie in der Luftfahrt ist eine direkte Elektrifi-

zierung für die Schifffahrt keine Option. Die grossen Entfernungen erschweren das Aufladen von Batterien, und die im Vergleich zu Schweröl deutlich geringere Energiedichte von Batterien hätte zur Folge, dass die Ladekapazität der Schiffe durch grosse und schwere Batterien erheblich reduziert würde.

Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit von CO₂-armen Schiffstreibstoffen sehr begrenzt, und es fehlt an einer globalen Infrastruktur zur Unterstützung alternativer Antriebssysteme. Die meisten der heute verwendeten CO₂-armen Schiffstreibstoffe sind Biokraftstoffe wie hydriertes Pflanzenöl und Fettsäuremethylester, die aus gebrauchtem Speiseöl, tierischen Fetten und bestimmten Pflanzenölen gewonnen werden.

Es ist allerdings zu erwarten, dass in diesem Jahrzehnt eine wachsende Zahl neuer «grüner Treibstoffe» auf den Markt kommen wird. Zu den Vorreitern zählen E-Ammoniak, E-Methanol, E-Diesel und E-LNG (siehe Abbildung 7; das Präfix «E» steht dabei für «elektrizitätsbasiert»). Wasserstoff ist einer der wichtigsten Bausteine all dieser Treibstoffe. Das bedeutet, dass ein klimaneutraler Schifffahrtssektor – ähnlich wie in der Luftfahrt – von der Schaffung einer zuverlässigen Versorgung mit wasserstoffbasierten

Frachtschiffe transportieren mehr als 80 % des weltweiten Handelsvolumens. Sie können Tausende von Containern auf einmal befördern sowie Massengüter wie Kohle, Eisenerz oder Getreide. Einige sind über 400 Meter lang.



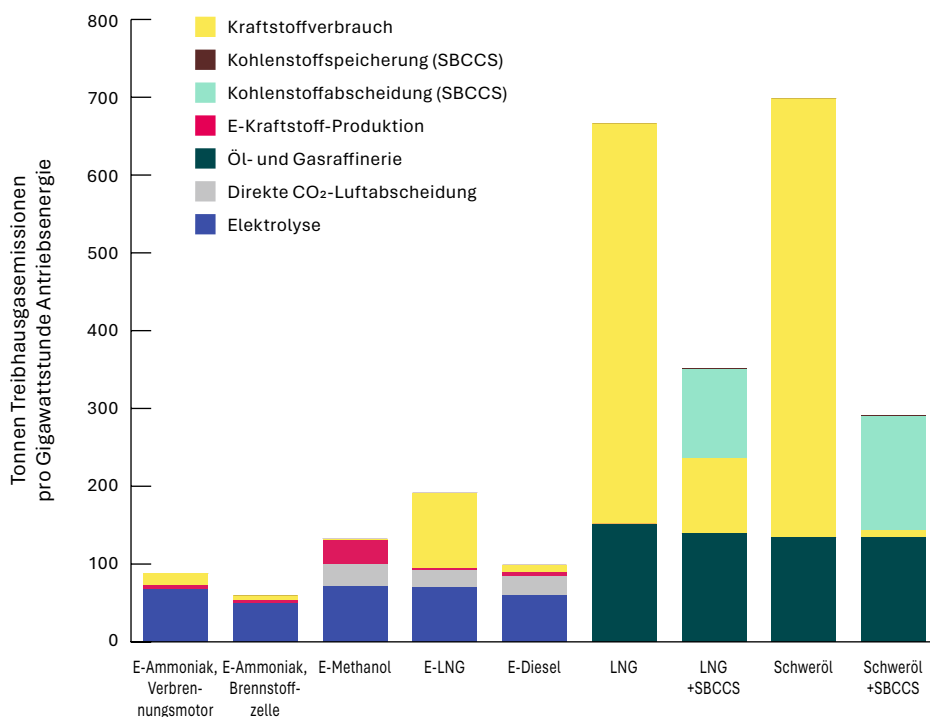


Abbildung 7: Lebenszyklus-Treibhausgas-emissionen verschiedener Schiffstreibstoffe

Diese Abbildung vergleicht die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen verschiedener Schiffstreibstoffe. Eine Gigawattstunde Schiffsantriebsenergie spiegelt sowohl die Energiedichte des Kraftstoffs als auch den jeweiligen Wirkungsgrad des Motors wider. LNG steht für Flüssigerdgas und SBCCS für schiffsbasierte CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Der SBCCS-Teilprozess umfasst die Emissionen, die durch die zusätzliche Kraftstoffverbrennung beim Betrieb der Abscheideanlage entstehen. Die Ergebnisse in dieser Grafik beziehen sich auf die E-Treibstoffproduktion in Spanien unter Verwendung von grünem Wasserstoff.

(Quelle: PSI-Labor für Energiesystemanalyse)

Treibstoffen abhängt. Im Gegensatz zu Flugzeugen, die sehr genau definierte Treibstoffe benötigen, können Schiffe sehr unterschiedliche Treibstoffe nutzen.

Die FuelEU-Maritime-Verordnung schreibt eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent gegenüber Schweröl vor. Unsere Untersuchungen zeigen, dass dieses Ziel mit synthetischen Treibstoffen – welche mit erneuerbarem Strom und Kohlendioxid oder Stickstoff aus der Luft hergestellt werden – erreicht oder sogar übertroffen werden kann. Allerdings gibt es noch offene Fragen hinsichtlich der Machbarkeit einer Skalierung dieser Technologien und ihrer Kosten. Darüber hinaus bestehen Bedenken hinsichtlich der einzelnen Kraftstoffarten.

E-Ammoniak ist beispielsweise giftig und ätzend und nicht mit aktuellen Motoren kompatibel. Ausserdem befindet sich die für die Versorgung von Schiffen mit diesem Treibstoff erforderliche Infrastruktur noch in der Entwicklung. Das grösste Umweltproblem bei der Verwendung von Ammoniak als Schiffskraftstoff ist die mögliche Freisetzung von Lachgas (N₂O) bei der Verbrennung in Verbrennungsmotoren, da N₂O ein äusserst starkes Treibhausgas ist. Über die Verbrennung hinaus kann die Herstellung von Ammoniak – insbesondere die bei seiner Synthese verwendete Wärmequelle – zu Stickoxidemissionen

(NO_x) führen. Stickoxide sind schädlich für Mensch und Umwelt und erfordern strenge Emissionskontrollen. Um eine maximale Reduktion der Treibhausgasemissionen und anderer Umweltauswirkungen zu erreichen, könnte E-Ammoniak in Festoxid-Brennstoffzellen verwendet werden. Dadurch würde die Verbrennung auf Schiffen gänzlich vermieden.

E-Diesel und E-Methanol zeichnen sich durch ihre Kompatibilität mit aktuellen Motoren aus. Allerdings werden beide langfristig voraussichtlich 35 bis 90 Prozent teurer sein als E-Ammoniak. Darüber hinaus können bei der Verbrennung von E-Methanol Formaldehyd und andere giftige Nebenprodukte entstehen. Da Formaldehyd mit Atemwegsproblemen und Umweltproblemen in Verbindung gebracht wird, ist die Emissionskontrolle bei der Verwendung von Methanol als Kraftstoff wichtig.

Ein weiterer Kandidat ist E-Flüssigerdgas oder E-LNG. Dieser Kraftstoff hat ein komplexeres Profil. Einerseits profitiert er von der etablierten globalen Infrastruktur und von Motoren, die von Natur aus strenge Emissionsstandards erfüllen, andererseits kann unverbranntes Methan, das aus Schiffsmotoren austritt – sogenannte «Methanleckagen» – seine Klimatauglichkeit beeinträchtigen. Methanleckagen könnten die Treib-

hausgasemissionen möglicherweise weit über das Reduktionsziel von 80 Prozent hinaustreiben, wodurch E-LNG gegenüber anderen synthetischen Treibstoffen weniger attraktiv wäre.

Letztendlich zeigen unsere Untersuchungen, dass die Dekarbonisierung der Schifffahrt eine hybride Strategie erfordert. Es sollten CO₂-arme Treibstoffe, darunter sowohl Biotreibstoffe als auch E-Treibstoffe, eingesetzt werden. Auf grossen Schiffen sollten zudem Anlagen zur CO₂-Abscheidung installiert werden. Eine strenge Überwachung der Emissionen über den gesamten Treibstofflebenszyklus hinweg sowie die Überwachung und Kontrolle von Wasserstofflecks, Methanleckagen und Stickoxidemissionen aus der Ammoniakverbrennung müssen eine regulatorische Priorität werden. Windgestützte Technologien und Effizienzsteigerungen bei kleinen Schiffen sollten ebenfalls eine Rolle spielen. Um Fortschritte zu erzielen, sind gezielte Investitionen und koordinierte internationale Standards erforderlich sowie die Bereitschaft der gesamten Branche, zu handeln, noch bevor die Kraftstoffe der Zukunft vollständig für den breiten Einsatz bereit sind. Es handelt sich um ein klassisches Henne-Ei-Problem, dessen Lösung frühzeitige Verpflichtungen seitens der Treibstoffhersteller sowie der Schifffahrts- und Hafenbetreiber erfordert.

«Die Schiffe können schon heute mit diesen neuen Brennstoffen fahren.»

Ein Gespräch mit Accelleron-CEO Daniel Bischofberger

Auf der einen Seite: globales Wirtschaftswachstum und ein steigender Gütertransport mit dem Schiff, traditionellerweise von schmutzigem Schweröl angetrieben. Auf der anderen Seite: Netto-Null-CO₂-Emissionsziele. Wie passt das Ihrer Meinung nach zusammen?

Daniel Bischofberger: Die Schifffahrtsbranche transportiert etwa 80 bis 90 Prozent aller Güter. Bis 2050 dürfte sich das Transportvolumen verdoppeln und der Treibstoffverbrauch um 70 Prozent steigen. Hier gibt es also noch Potenzial für Effizienzsteigerungen.

Früher war die Schifffahrtsbranche so etwas wie die Müllhalde der Ölindustrie. Sie hat den letzten Rest des Ölfasses zusammengekratzt und auf den Schiffen verbrannt. Hier ist eine radikale Änderung durch die International Maritime Organisation (IMO) zu beobachten. Die IMO ist eine UN-Organisation, die für die gesamte Schifffahrtsbranche verantwortlich ist. Sie hat sich zur Klimaneutralität bis 2050 verpflichtet. Erste Priorität ist der Umstieg auf CO₂-ärmere Brennstoffe, zweite Priorität ist die Steigerung der Effizienz. Die Schifffahrt ist die einzige Industrie, die global reguliert wird. Das bietet eine einmalige Chance, eine Führungsrolle in der Dekarbonisierung zu übernehmen.

In welchen Lösungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sehen Sie das grösste Potenzial?

DB: Die Schifffahrt gilt als sogenannte «schwer zu dekarbonisierende Industrie», das heisst, sie lässt sich nicht allein durch Elektrifizierung dekarbonisieren. Ein Beispiel: Ein grosses Containerschiff,

Ammoniak und Methanol kommt ausserdem eine geringe Energiedichte hinzu. Verglichen mit Diesel benötigt man doppelt so viel Brennstoff, das heisst, mehr Platz auf dem Schiff.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass ein Schiff heute für eine Lebensdauer von 30 Jahren gebaut wird. Vermutlich muss man dann nach

«Wir müssen jetzt die Sektoren miteinander verknüpfen, denn wir alle benötigen das Gleiche: grünen Wasserstoff.»

das von China nach Europa fährt, benötigt 40 Gigawattstunden Energie. Das entspricht etwa der eineinhalbfachen Tagesproduktion von Leibstadt, dem grössten Kernkraftwerk in der Schweiz. Eine entsprechende Batterie würde etwa 200 000 Tonnen wiegen. Ein solches Schiff hat dafür nicht die erforderliche Frachtkapazität.

Langfristig sind synthetische Treibstoffe eindeutig die Hauptlösung. In der Schifffahrt geht der Trend zu Ammoniak und Methanol. Generell sind synthetische Treibstoffe teuer und benötigen viel Equipment für die Produktion. Bei

der Hälfte dieser Zeit das Schiff modernisieren, um neue Brennstoffe verwenden zu können. Für uns ist das ideal, weil wir unsere Produkte dann zwei- oder dreimal modernisieren oder überholen können.

Welche technologischen Herausforderungen sind mit der Anpassung von Schiffen an neue, CO₂-arme Brennstoffe verbunden?

DB: Wichtig ist, dass das jeder versteht: Schiffe können bereits heute mit diesen

neuen Brennstoffen fahren. Sie fahren schon seit Längerem mit Biodiesel und ähnlichen Kraftstoffen. Die ersten mit Methanol betriebenen Containerschiffe sind schon seit 2023 unterwegs und in diesem Jahr kommen die ersten Schiffe mit Ammoniakantrieb.

Die Schiffe sind bereit. Die Technologie ist da. Es fehlen lediglich neue Standards. Da Ammoniak giftig ist, müssen nun natürlich neue Sicherheits- und Handhabungsstandards definiert und die Schiffsbesatzungen geschult werden. Erste Pilotprojekte dazu gibt es bereits.

Welche Umstellungen braucht es in den Häfen?

DB: Das ist natürlich eine grosse Herausforderung. Es genügt nicht zu wissen: Da gibt es einen Hafen und der hat Brennstoff. Sondern man muss noch schauen, ist das Ammoniak, ist das Methanol, ist das Erdgas, ist das Schweröl?

Dann kommt die «Henne-oder-Ei»-Problematik dazu: Die Schiffe sind bereit, aber der Brennstoff ist noch nicht da. Es gibt viele sogenannte «schwer zu dekarbonisierende Industrien», die alle grünen Wasserstoff suchen. Wer produziert ihn dann schlussendlich?

Die Schifffahrt ist gross, aber nicht gross genug, um ein solches Wasserstoffökosystem allein auf die Beine zu stellen. Wir müssen also jetzt die verschiedenen Sektoren miteinander verknüpfen, denn wir alle benötigen das Gleiche: grünen Wasserstoff. Wenn wir den Bedarf bün-

Brennstoffe sind heute wahrscheinlich fünf- bis zehnmal teurer als fossile Brennstoffe. Man rechnet aber damit, dass sie nur das Doppelte bis Dreifache kosten werden, sobald grosse Mengen hergestellt und die Technologien industrialisiert werden. Wer möchte also

«Bei Kraftstoffen ist die Herausforderung keine technologische, sondern eine kommerzielle.»

deln, dann brauchen wir Riesenmengen. Die Flugzeugbranche, die Schifffahrt, die Stahlproduktion, Chemie und Zement, Düngemittelindustrie und sogar Kraftwerke – zusammen werden sie ungefähr 600 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr benötigen.

Es sollten also Synergien zwischen diesen Branchen genutzt werden?

DB: Ja. Konkurrieren würde nur bedeuten, dass gar nichts geschieht, weil jeder den billigsten Brennstoff möchte. Jemand muss die Anschubfinanzierung übernehmen, denn diese synthetischen

jetzt in eine Produktionsanlage investieren, wenn es in fünf Jahren billigere Lösungen gibt? Bei Kraftstoffen ist die Herausforderung keine technologische, sondern eine kommerzielle.

Wie sieht es in der Schifffahrtsbranche mit der Verpflichtung zur Abnahme dieser neuen Treibstoffe aus?

DB: Hier muss es jetzt einfach Vorschriften geben. Entweder man verpflichtet alle zu investieren, oder man beginnt mit den Akteuren in der Schifffahrtsbranche, die sich das am ehesten leisten können. Bei Gütern, die eigentlich einen hohen Wert haben, sind die Frachtkosten ja vernachlässigbar. Wenn ein Turnschuh jetzt 5 oder 10 Rappen mehr kostet, werden die Leute weiterhin diese Schuhe kaufen.

Das heisst also, dass die Kosten synthetischer Treibstoffe als erstes bei global transportierten Konsumgütern aufgeschlagen werden sollten, die am wenigsten preissensitiv sind?

DB: Ja. Der Schifffahrtsbranche ist es egal, ob ein Transport 10 oder 20 Prozent teurer wird. Nur weil das Schiff teurer wird, findet der Transport nicht deshalb mit dem Flugzeug statt. Die Eisenbahn ist auch keine Alternative. Das Schiff ist das einzige effiziente Transportmittel, das über grosse Strecken zwischen Kontinenten hin- und herfahren kann.



Daniel Bischofberger

ist seit 2022 CEO von Accelleron, einem Anbieter von Turboladertechnologien und Energiesystemlösungen. Mit Fokus auf Dekarbonisierung hat er das Portfolio über die 100-jährige Kernkompetenz der Turbolader hinaus auf Einspritzsysteme für die Energiewende sowie digitale und KI-basierte Lösungen erweitert. Zuvor war er in verschiedenen leitenden Positionen in der Industrie tätig.

Accelleron ist international tätig. Welche Unterschiede sehen Sie zwischen den Märkten in Europa, Asien und anderen Regionen im Hinblick auf die Energiewende im Transportsektor?

DB: Es gibt Unterschiede. Vorreiterin ist die EU. Sie verlangt beispielsweise von jedem Schiff, das in einen EU-Hafen einfährt, Zertifikate für 50 % der CO₂-Emissionen zu kaufen, die auf dem Weg vom letzten Hafen nach Europa emittiert wurden. Wir sehen auch, dass China und Australien jetzt in die Wasserstoffproduktion investieren. Westaustralien hat beispielsweise bereits einen Ammoniak-Hub. In Kanada gibt es jetzt ebenfalls Investitionen in eine Ammoniakproduktion, die auf grünen Wasserstoff basiert. Und wir sehen, dass Häfen wie Singapur oder Rotterdam in die Infrastruktur investieren.

Wie sieht es mit den Vorschriften der einzelnen Häfen bezüglich der Verwendung von sauberen Treibstoffen aus? Spielen die Luftqualitätsvorschriften eine Rolle?

DB: Ja, erstens dürfen Schiffe in bestimmten Bereichen nicht mehr mit Schweröl fahren. Viele Schiffe haben jetzt sogenannte Dual-Fuel-Motoren, die mit einer Kombination aus Diesel und Methanol oder Schweröl und Erdgas betrieben werden. Es gibt alle möglichen Kombinationen, um den verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden.

Zweitens benötigen die Schiffe in den Häfen Strom, doch die erforderliche Infrastruktur für die Versorgung vom Land muss erst aufgebaut werden. Das ist alles machbar und die Dinge bewegen sich, aber es braucht einfach noch mehr Rechtssicherheit, um die Investitionen wieder zu amortisieren. Man

merkt, dass die Schifffahrtsbranche in Bewegung ist. Die Dekarbonisierung ist ein Jahrhundertprojekt, aber wir haben nur noch 25 Jahre Zeit. Wir sollten also beschleunigen. Beim aktuellen Tempo wird es eher ein 200-Jahre-Projekt.

Welche politischen oder regulatorischen Rahmenbedingungen wären aus Ihrer Sicht entscheidend, um den Markthochlauf von nachhaltigen Antrieben zu beschleunigen?

DB: Für die Zwischenzeit sind Biokraftstoffe und auch Erdgas immer noch besser als Schweröl. Wir müssen jedoch sicherstellen, dass heutige Übergangslösungen keine Dauerlösungen werden.

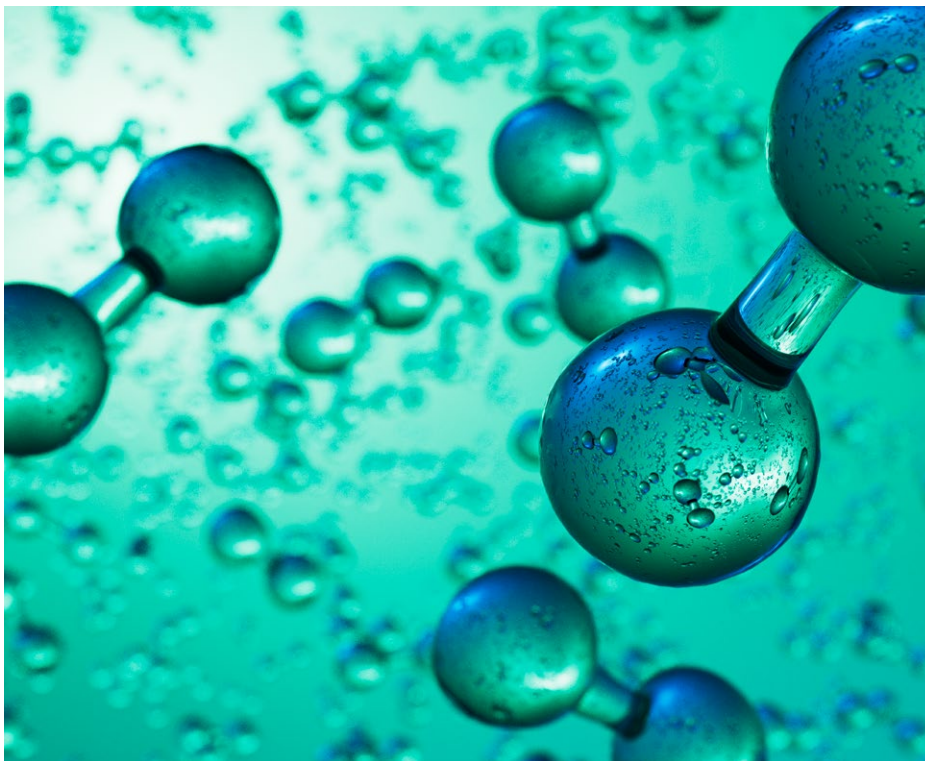
Das andere ist: Man kann natürlich nicht die gesamte Schifffahrtsbranche

inklusive meiner Kinder, ganz und gar unfair. Wir hinterlassen den nächsten Generationen gerade eine grosse Hypothek und sagen: «Wir hatten billige Brennstoffe und ihr dürft jetzt die Folgekosten bezahlen.» Ich glaube, am Schluss ist die Frage: Ist die Gesellschaft bereit, auch in die Zukunft zu investieren und nicht nur für ihren heutigen Konsum?

«Die Dekarbonisierung ist ein Jahrhundertprojekt, aber wir haben nur noch 25 Jahre Zeit.»

mit hohen Strafen zerstören. Aber man muss auch aufpassen, dass am Ende nichts passiert und man nur die Strafe bezahlt.

Die ganze Dekarbonisierung kommt nicht gratis. Die Brennstoffe sind teurer. Aber ich glaube, wir müssen Äpfel mit Äpfeln vergleichen. Fossile Brennstoffe liefern die billigste Energie. Nur spiegelt der Preis nicht die tatsächlichen Kosten dieser Brennstoffe wider. In Zukunft werden wir Riesensummen bezahlen müssen, um die Folgeschäden des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre zu kompensieren. Das finde ich persönlich für die nächsten Generationen,



Ausblick

Trotz aller Einschränkungen hinsichtlich Ressourcen, Importmöglichkeiten und gesellschaftlicher Akzeptanz wird Wasserstoff für die Umsetzung der Energiewende gebraucht. Seine Zukunft hängt ebenso sehr von der Politik wie von der Technologie ab.

Wasserstoff und daraus hergestellte Energieträger sind keine Wunderwaffen. Die Luft- und Schifffahrt sowie die Industrie sind mit hohen Kosten, einem hohen Ressourcenbedarf und infrastrukturellen Hürden konfrontiert. Eine klimaneutrale Hochskalierung erfordert einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien sowie die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid. In dieser Ausgabe des PSI Energie-Kompass haben wir Folgendes aufgezeigt:

- **Prioritäten sind unerlässlich.** Grüner Wasserstoff verbraucht knappe Ressourcen wie Wasser, Land und wichtige Mineralien, während blauer Wasserstoff auf CO₂-Speicherung angewiesen ist, über die die Schweiz nicht verfügt. Den

höchsten Nutzen haben Wasserstoff und daraus hergestellte Energieträger in der Stahl-, Zement- und chemischen Industrie, im Fernverkehr und in der saisonalen Energiespeicherung – nicht jedoch in Heizungsanlagen oder Autos.

- **Die globale Versorgung erfordert Kompromisse.** Das grösste Potenzial für eine kostengünstige Produktion liegt in Australien, Afrika und Amerika, oft in Regionen mit Wasserknappheit und abhängig von fragilen Lieferketten für kritische Rohstoffe. Bei Wasserstoff geht es ebenso sehr um Geopolitik und ökologische Grenzen wie um Technologie. Zu den wichtigsten Themen gehören die Auswirkungen des Abbaus und der Verarbeitung von Rohstoffen

sowie Herausforderungen in Bezug auf Landnutzung und Zertifizierung.

- **Wasserstoff kann in der Schweiz an Bedeutung gewinnen.** Dies muss jedoch im systemischen Kontext verstanden werden. Wasserstoff unterstützt die Dekarbonisierung der Industrie und die saisonale Speicherung, indem er die im Sommer gewonnene Solarenergie in die Winterversorgung überführt. Da die heimische Produktion begrenzt bleiben wird, wird die Schweiz weiterhin von Importen abhängig sein. Dafür sind grenzüberschreitende Pipelines, Zertifizierungen, Standards und langfristige Verträge unerlässlich.
- **Auch die Märkte spielen eine Rolle.** Ohne internationale Netze funktioniert die saisonale Speicherung nur bei grösseren Preisunterschieden zwischen Winter und Sommer und mit Vorschriften, die eine kohlendioxidarme Versorgung begünstigen. Eine europäische Angleichung von Märkten, Standards und Infrastruktur ist robuster als isolierte Ansätze.
- **Luftfahrt und Schifffahrt zeigen die Grenzen der Substitution auf.** Synthetische Kraftstoffe sind zwar unverzichtbar, reichen aber nicht aus. Die Luftfahrt benötigt darüber hinaus eine Abkehr vom unbeschränkten Wachstum und neue Flugzeuge, die Schifffahrt hybride Strategien, die synthetische Kraftstoffe, Effizienzsteigerungen und Abscheidung von Kohlendioxid kombinieren.

Weitere Forschung dazu, wie Wasserstoff in das Puzzle der Energiewende passt, ist wichtig. In unserem Labor laufen Projekte zur Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Wasserstofftechnologien, der globalen Priorisierung von Wasserstoffanwendungen sowie der Umweltauswirkungen und der Machbarkeit geplanter globaler Wasserstoffprojekte mitsamt der Einbindung Schweizer Entwicklungen in das europäische System. Die Debatte darf sich nicht darum drehen, ob Wasserstoff eine Rolle spielen wird, sondern wie Politik, Infrastruktur und internationale Zusammenarbeit so aufeinander abgestimmt werden können, dass Wasserstoff und seine Derivate dort eingesetzt werden, wo sie den grössten Nutzen für das Klima und die Gesellschaft bringen.

Abonnieren Sie den PSI Energie-Kompass

Wenn Sie daran interessiert sind, unsere wissenschaftlich fundierten Analysen weiterhin in Papierform oder digital zu erhalten, können Sie den PSI Energie-Kompass unter folgendem Link kostenlos abonnieren:



[www.psi.ch/de/lea/
psi-energie-kompass](http://www.psi.ch/de/lea/psi-energie-kompass)

Impressum

PSI Energie-Kompass — Orientierung für die Energiewende

Ausgabe # 1/2026
ISSN 3042-7193

Herausgeber
Paul Scherrer Institut PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI

Redaktionsteam
Carolyn Kerchof, Christian Bauer,
Vinh Dang, Evangelos Panos,
Russell McKenna

**Zusätzlich beteiligte Forscher
dieser Ausgabe**
Martin Densing, Zipeng Liu,
Christian Moretti, Romain Sacchi,
Tom Terlouw und Karin Treyer

Redaktionelle Unterstützung
Martina Gröschl

Übersetzung deutsche Ausgabe
Daniel Bullinger, Christian Bauer

Übersetzung französische Ausgabe
Catherine Riva, Vinh Dang


Layout
Monika Blétry

Grafiken
Carolyn Kerchof ausser
Abbildung 3: Costas P. Polátoglou

Fotos
Adobe Stock ausser
Titelseite/Seite 27: Monika Blétry,
Seite 12: Scanderbeg Sauer
Photography (Elektrolyseur),
Seite 19: Ramon Hess, Gabriel Müller,
Seite 25: Accelleron
(Daniel Bischofberger)

Energiesystemanalyse bei PSI
Das Labor für Energiesystemanalysen (LEA) betreibt ganzheitliche, analytische Forschung zu verschiedenen Energietechnologien und -systemen, einschliesslich nuklearer, fossiler und erneuerbarer Energien. Unsere Aufgabe ist es, herausfordernde Forschung zu betreiben, die die Entscheidungsfindung unterstützt, Kapazitäten aufbaut, das Bewusstsein schärft und die Ausbildung in der Energiesystemanalyse fördert.

PSI Labor für Energiesystemanalysen
www.psi.ch/de/lea
lea-info@psi.ch

Folgen Sie uns auf LinkedIn
 [@PSI Laboratory
for Energy Systems
Analysis \(LEA\)](#)

In dieser Ausgabe zitierte Publikationen

Allgoewer, L., Becattini, V., Patt, A., Grandjean, P., Wiegner, J. F., Gazzani, M., & Moretti, C. (2024). Cost-effective locations for producing fuels and chemicals from carbon dioxide and low-carbon hydrogen in the future. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01287

Brazzola, N., Meskaldji, A., Patt, A., Tröndle, T., & Moretti, C. (2025). The role of direct air capture in achieving climate-neutral aviation. *Nature Communications*, 16, 588. DOI: 10.1038/s41467-024-55482-6

Ingwersen, A., Hahn Menacho, A. J., Pfister, S., Peel, J. N., Sacchi, R., & Moretti, C. (2025). Prospective life cycle assessment of cost-effective pathways for achieving the FuelEU Maritime Regulation targets. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177880

Kober, T., et al. (2024). GAZNAT lined rock cavern (LRC) storage report. GAZNAT.

Liu, Z., Terlouw, T., Frey, P., Bauer, C., & McKenna, R. (2025). Global cost drivers and regional trade-offs for low-carbon fuels: A prospective techno-economic assessment [Preprint, ChemRxiv].

Panos, E., et al. (2023). An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland. *Communications Earth & Environment*. DOI: 10.1038/s43247-023-00813-6

Panos, E., et al. (2024). POLIZERO – Swiss policy towards zero CO₂ emissions compatible with the European decarbonisation pathways: Final report to SFOE. Ittigen: Swiss Federal Office of Energy.

Sacchi, R., Becattini, V., Gabrielli, P., Cox, B., Dirnaichner, A., Bauer, C., & Mazzotti, M. (2023). How to make climate-neutral aviation fly. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-023-39749-y

Saad, D. M., Terlouw, T., Sacchi, R., & Bauer, C. (2024). Life cycle economic and environmental assessment of producing synthetic jet fuel using CO₂/biomass feedstocks. *Environmental Science & Technology*. DOI: 10.1021/acs.est.4c01578

Terlouw, T., Rosa, L., Bauer, C., & McKenna, R. (2024). Future hydrogen economies imply environmental trade-offs and a supply-demand mismatch. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-024-51251-7

Terlouw, T., Moretti, C., Harpprecht, C., Sacchi, R., McKenna, R., & Bauer, C. (2025). Global greenhouse gas emissions mitigation potential of existing and planned hydrogen projects. *Nature Energy*. DOI: 10.1038/s41560-025-01892-9

Treyer, K., Sacchi, R., & Bauer, C. (2022). Life cycle assessment of synthetic hydrocarbons for use as jet fuel: "Power-to-Liquid" and "Sun-to-Liquid" processes. Bern: Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA).

Forschung gefördert durch: das Bundesamt für Energie; Innosuisse; die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz; die Europäische Kommission; die Europäische Agentur für Gesundheit und Digitales; das Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation; das Zentrum für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft; UK Research and Innovation; Gaznat; die Energiesystem Integrationsplattform des PSI; das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; das Bundesamt für Zivilluftfahrt; und den ETH-Rat.

Paul Scherrer Institut PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
Schweiz
www.psi.ch