

Kurzstudie

Wasserstoff für die Bodenseeregion

5. Oktober 2023

IET Institut für Energietechnik

Prof. Dr. Markus Friedl

OST Ostschweizer Fachhochschule
Departement Technik | Abteilung EEU
IET Institut für Energietechnik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil-Jona

Autor:

Prof. Dr. Markus Friedl

Auftraggeberinnen:

- [IHK St.Gallen-Appenzell](#)
- [IHK Thurgau](#)
- [IHK Schwaben](#)
- [IHK Hochrhein Bodensee](#)
- [IHK Bodensee – Oberschwaben](#)
- [Wirtschaftskammer Vorarlberg](#)

Auftragnehmerin:

- [OST – Ostschweizer Fachhochschule, IET Institut für Energietechnik](#)

Wir gestalten eine nachhaltige Energiezukunft durch Innovation. Die 40 Mitarbeitenden des IET forschen und lehren zu unterschiedlichen Technologien für eine erneuerbare Energieversorgung. Seit 2014 ist das IET ein Kompetenzzentrum im Bereich Power-to-X und Wasserstoff. Das IET organisiert regelmässig die [Expertinnen- und Expertengespräche Power-to-X](#), informelle Erfahrungsgruppen zu Power-to-X und Methanol und ist Mitglied im [Verein H2 Produzenten Schweiz](#). Aktuell arbeitet das IET in den internationalen Forschungsprojekten [24/7 ZEN](#), [HIGGS](#), [ERIG](#) und [IEA Advanced Motor Fuels \(IEA-AMF\)](#).

Markus Friedl leitet das [IET Institut für Energietechnik](#). Er ist Mitgründer der [Interessengemeinschaft Power-to-X \(IG-PtX\)](#), im Vorstand des [Industriesektors "New Energy Systems" \(NES\)](#) von [Swissmem](#), Co-Präsident des [Swiss Power-to-X Collaborative Innovation Network \(SPIN\)](#) und im Vorstand von [HeurekaLAGO](#).

Titelbild: Wasserstoffmolekül, mit Einverständnis des VSG

Abstract

Diese Kurzstudie zeigt die zukünftige Rolle von Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff in einer nachhaltigen Wirtschaft auf. Wasserstofftechnologien und damit zusammenhängende Dienstleistungen sind für die Unternehmen im Bodenseeraum spannende Produkte, die sie im In- und Ausland absetzen können. Die globale Nachfrage nach Produkten im Zusammenhang mit Wasserstoff nimmt aktuell stark zu. Der Bericht zeigt auf, dass eine grosse Zahl an Informationen zum Thema Wasserstoff verfügbar ist. Ein Teil davon wird in dieser Kurzstudie in Bezug zu seiner Bedeutung für die Bodenseeregion eingeordnet.

Die aufgezeigten Aktivitäten auf globaler, europäischer und auf den nationalen Ebenen zeigen, dass Wasserstoff kein Hype mehr ist. Grüner Wasserstoff setzt sich jetzt gerade als Energieträger und Rohstoff durch und spielt in einer zunehmend nachhaltigen Wirtschaft eine wichtige Rolle. Es ist keine Frage, ob und wann Wasserstoff eingeführt wird, sondern nur noch wie viel und für welche Anwendungen.

Kurzfristig sind die lokale Produktion von Wasserstoff und seine Verwendung wichtig, auch in der Bodenseeregion. Ab 2030 wird ergänzend der Import von nachhaltigem Wasserstoff zunehmend wichtig, um den gesamten Bedarf zu decken. Eine europäische Wasserstoff-Infrastruktur ist in der Planung und wird bis 2030 auch den Bodensee erreichen. Der Ausbau der Infrastruktur in der Bodenseeregion kann entlang der bestehenden Gasnetze durchgeführt werden. Der Bericht skizziert ein paar Ideen dazu.

Die Kurzstudie schliesst mit konkreten Vorschlägen für die beauftragenden Handels- und Wirtschaftskammern und ihre Mitglieder, sich bei den aktuellen Planungen, bei der Standardisierungen und in Projekte aktiv einzubringen oder neue Projekte zu lancieren.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	4
1. Einleitung	5
2. Grundlagen	6
2.1 Herstellung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff	6
2.2 Energiesystem und chemische Energieträger.....	9
2.3 Wasserstoff heute	10
3. Die zukünftige Rolle von Wasserstoff	11
3.1 Wasserstoff als Energieträger	11
3.2 Wasserstoff als Rohstoff.....	14
3.3 Wasserstoff-Technologien als Produkte	14
3.4 Global.....	14
3.5 Europa.....	15
4. Wasserstoff in der Bodenseeregion	17
4.1 Schweiz.....	17
4.2 Fürstentum Liechtenstein	19
4.3 Deutschland	20
4.4 Österreich.....	21
4.5 Bodenseeregion	22
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25
Quellenverzeichnis	27
Anhang: Netzwerke	31

1. Einleitung

Das Thema Wasserstoff entwickelt sich sehr dynamisch, und zwar mit zunehmender Geschwindigkeit. Eine immer grössere Zahl von Analysen, Berichten und Presseerklärungen werden von Forschungsgruppen, Branchenverbänden, politischen Instanzen, Firmen und Lobbyorganisationen veröffentlicht. Im Bereich Wasserstoff finden Gesetzgebungsprozesse und Standardisierungen statt, es werden Firmengründungen und -übernahmen sowie Investitionsentscheide bekannt gegeben und neue Netzwerkorganisationen gegründet. Die Schwierigkeit besteht darin, die vielen Informationen einzuordnen und einen Überblick zu bekommen, auch weil zum Teil voneinander abweichende Aussagen gemacht werden. Die vielen Informationen machen aber auch klar, dass nachhaltig produzierter Wasserstoff dabei ist, eine wichtige Rolle als Energieträger und Rohstoff zu übernehmen. Doch welche Rolle das genau sein wird, weiss heute niemand.

Diese Kurzstudie ordnet verfügbare Informationen in Bezug auf den Bodensee ein mit den folgenden Zielen:

- Eine Bestandesaufnahme der bereits vorhandenen Bestrebungen zur zukünftigen Verwendung von Wasserstoff und den Entwicklungen im Bereich der Infrastruktur. Es werden ausgewählte Entwicklungen in den Ländern Schweiz, Fürstentum Liechtenstein, Deutschland und Österreich beleuchtet.
- Die Kurzstudie ist eine Diskussionsgrundlage zur Entwicklung eines weiteren Vorgehens für die Auftraggeberinnen, um in einem weiteren Prozess eine Soll-Analyse zu entwickeln.
- Die Studie zeigt konkrete Beispiele, wie die beauftragenden Handels- und Wirtschaftskammern des Bodenseeraums das Thema Wasserstoff in Zukunft angehen können.

Die Kurzstudie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das war in der kurzen, zur Verfügung stehenden Zeit und angesichts der starken Dynamik des Themas Wasserstoff auch nicht möglich. Der Autor kennt vor allem die Situation in der Schweiz, weswegen diese Kurzstudie die Schweiz am besten abdeckt. Das bedeutet jedoch nicht, dass in den anderen Ländern der Bodenseeregion weniger Aktivitäten im Bereich Wasserstoff zu beobachten wären. Eine Einführung in das Thema Wasserstoff und die Situation in der Bodenseeregion ist auch in einem Bericht aus dem Jahr 2021 von der Fachhochschule Vorarlberg [40] zu finden.

2. Grundlagen

2.1 Herstellung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff

Wasserstoff H_2 ist ein Molekül, das aus zwei Wasserstoffatomen H besteht (Abbildung 1) und im Vergleich mit anderen Gasmolekülen sehr klein und leicht ist, jedoch gleich viel Volumen wie andere Gasmoleküle in Anspruch nimmt¹. Während Wasserstoff das Molekül ist, das pro Masse am meisten Energie speichern kann,² nimmt in Wasserstoff gespeicherte Energie im Vergleich mit anderen Molekülen viel Volumen ein³. Weil das Wasserstoffmolekül klein ist, kann es auch durch sehr kleine Öffnungen strömen und in Materialien hindurchdiffundieren, die für andere Moleküle nicht durchlässig sind.

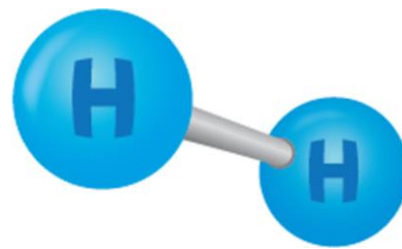


Abbildung 1: Wasserstoffmolekül H_2 aus zwei Wasserstoffatomen H .

Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern ein Energieträger und Rohstoff. Aus Wasserstoff können in nachgelagerten Prozessen zusammen mit Kohlendioxid CO_2 oder Kohlenmonoxid CO die Stoffe Methan CH_4 , Methanol CH_3OH oder höhere Kohlenwasserstoffe (e-Fuels) produziert werden. Wasserstoff kann zusammen mit Stickstoff N_2 zu Ammoniak NH_3 verarbeitet werden. Diese Substanzen sind sowohl Energieträger als auch Rohstoffe für die Produktion von Gütern wie Stahl, Kunststoffe und Dünger.

Wasserstoff ist farblos. Je nach Produktionsart werden dem Wasserstoff unterschiedliche Farben zugeordnet wie in Tabelle 1 gezeigt. In einer nachhaltigen Wirtschaft möchte man in Zukunft nur noch "grünen" Wasserstoff verwenden, der auf erneuerbaren Energien beruht. Die Produktion mittels Elektrolyse mit elektrischen Leistungen grösser als $1 MW_{el}$ steht dabei im Vordergrund (Power-to-X). Die Produktion aus Biogas kann in Zukunft auch wegen der möglichen negativen CO_2 Emissionen an Bedeutung gewinnen. Ob mit Atomstrom produzierter "pinker" bzw. "roter" Wasserstoff als nachhaltig akzeptiert wird, ist eine gesellschaftliche Diskussion. Als Übergangslösungen kann auch blauer oder türkisener Wasserstoff aus fossilen Energiequellen Verwendung finden, der ohne CO_2 Emissionen produziert wird. Über natürlich vorkommenden "weissen" Wasserstoff ist bisher wenig bekannt.

Grosse Elektrolyseure erzeugen Wasserstoff mit einem Wirkungsgrad von ca. 70 %⁴. Die Verluste sind ein Nachteil, der den Vorteilen der besseren Speicherbarkeit und Transportierbarkeit von Wasserstoff im Vergleich mit Elektrizität gegenübersteht. Ein zusätzlicher Energieaufwand entsteht bei der Einspeicherung. Die verschiedenen Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern, sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die gute Speicher- und Transportierbarkeit von Wasserstoff erlauben es, in globalisierten Märkten Preissignale über weite Distanzen weiterzugeben.

-
- ¹ Bis zu einem Druck von ca. 350 bar verhält sich Wasserstoff wie ein ideales Gas, bei denen pro Molekül gleich viel Platz eingenommen wird.
 - ² Die Energie pro Masse ist 3.1 mal so gross wie bei Diesel (Brennwert).
 - ³ Abhängig von der Art der Speicherung. Zum Beispiel enthält ein Liter, in dem Wasserstoff unter einem Druck von 350 bar gespeichert wird (Standard für LKWs), 11.4 mal weniger Energie als Diesel (Brennwert).
 - ⁴ Wirkungsgrad hier definiert als Energie im Brennwert des Wasserstoffs dividiert durch elektrische Energie.

Produktionsprozess	Energiequelle	Farbe	Fossile CO ₂ Emissionen
Unterschiedliche Verfahren der Petrochemie	Steinkohle	schwarz	Fossiles CO ₂ wird bei der Produktion freigesetzt.
	Braunkohle	braun	
	Erdgas oder Erdöl	grau	
Elektrolyse (Wirkungsgrad ⁶ ca. 70 % für 1 MW _{el} und mehr)	Erneuerbarer Strom	grün	Keine bzw. sehr geringe fossile CO ₂ Emissionen.
	Atomstrom	pink, rot	
	Strommix aus Netz	gelb	Fossile CO ₂ Emissionen aus nicht erneuerbarem Strom.
	Fossiler Strom	grau	
Pyrolyse ⁷ (Kohlenstoff verbleibt als Feststoff)	Biogas	grün	Negative CO ₂ Emissionen. ⁸
	Erdgas	türkis	Keine bzw. sehr geringe CO ₂ Emissionen.
Natürliche Vorkommen oder Wasserstoff als Abfallprodukt	Wasserstoff	weiss	Nutzung Wasserstoff verursacht keine oder geringe zusätzliche CO ₂ Emissionen.
Solarthermie, Grünalgen, Halbleiter (Forschung)	direktes Sonnenlicht	grün	Keine fossilen CO ₂ Emissionen.

Tabelle 1: Farbe von Wasserstoff. Verwendung der Bezeichnungen nicht einheitlich, [9] [40].

Methode	Bemerkungen
komprimiert (CH ₂)	Gasförmig in Tanks oder geeigneten Untertage-Gasspeichern, in Pipelines bis 50 bar, Fahrzeuge: 350 bar für LKWs, 700 bar für PKWs ⁹
verflüssigt (LH ₂)	Abkühlen auf $-253\text{ °C} = 20\text{ K}$ ¹⁰ , für interkontinentale Transporte auf Schiffen, weite Distanzen in Kryotrailern oder in Grossspeichern.
chemisch gebunden	Technologien verfügbar, um aus Wasserstoff H ₂ die Stoffe Methan CH ₄ , Methanol CH ₃ OH und Ammoniak NH ₃ herzustellen und wieder zurück zu Wasserstoff H ₂ . Organische Flüssigkeiten (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC) sind noch nicht marktreif.
Metallhydride	Wasserstoff wird in Metallgitter eingebunden ¹¹ . Andere Festkörper, die Wasserstoff aufnehmen können sind Metallic Organic Frameworks (MOF), die noch nicht marktreif sind.

Tabelle 2: Speicher- und Transportmöglichkeiten von Wasserstoff.

⁵ CCS: Carbon Capture and Storage = Carbon Capture and Sequestration, CCU: Carbon Capture and Utilisation

⁶ Energie im Wasserstoff (Brennwert) dividiert durch die aufzuwendende elektrische Energie.

⁷ Hochtemperaturprozess ohne Sauerstoff, bei dem CH₄ in reinen Kohlenstoff und Wasserstoff H₂ zerfällt. In einem Projekt der RAG Austria AG wird diese Technologie als "Methan-Elektrolyse" bezeichnet [42].

⁸ NET = Negative Emissions Technology

⁹ Einige Hersteller von LKWs wollen in Zukunft auch 700 bar verwenden.

¹⁰ Die Firma [Linde Kryotechnik](#) im Kanton Thurgau beherrscht diese Technologie. Zum Vergleich: Verflüssigtes Methan (LNG) wird auf -160 °C abgekühlt.

¹¹ Produkte verfügbar unter anderem von [GRZ Technologies](#) (Schweiz), [GKN Hydrogen](#) (Deutschland)

Wasserstoff kann auf Arten transportiert werden, die sich aus Tabelle 2 ableiten [20]:

- Komprimiert (CH_2) in Trailern oder Containern: Solange keine Infrastruktur mit Pipelines vorhanden ist. Der Wasserstoff wird auf 350 bar oder 450 bar komprimiert. In der Schweiz wird grüner Wasserstoff zwischen den beiden aktuellen Produktionsanlagen und den aktuell 15 Wasserstoff-Tankstellen mit Container transportiert [29].
- Komprimiert (CH_2) in Pipelines: Sie werden typischerweise mit Drücken bis 50 bar betrieben und sind im Vergleich mit Trailern für grössere Mengen Wasserstoff sehr leistungsfähig und günstig. Wasserstoff kann bis 10 % oder 20 % dem Methan beigemischt werden, das im existierenden Erdgasnetz transportiert wird. Die aktuelle Planung sieht vor, keine höheren Wasserstoffkonzentrationen im Erdgasnetz zu transportieren, sondern reiner Wasserstoff in umgewidmeten Erdgasleitungen oder neu erstellten Pipelines zu transportieren. Letztere können parallel zu bestehenden Erdgasleitungen verlegt werden. Deutschland verfügt über Wasserstoff-Pipelines, in der Schweiz gibt es erste Projekte.
- Verflüssigt (LH_2) in Kryotrailern.
- Verflüssigt (LH_2) auf Schiffen: Seit 2020 gibt es den LH_2 -Carrier "Suiso Frontier", der Wasserstoff zwischen Australien und Japan transportiert [28]. Weitere Schiffe sind in der Designphase.
- Chemisch gebunden in Form von Methan (die gesamte Erdgasinfrastruktur mit seinen Netzen und Speichern steht dafür zur Verfügung), Methanol (flüssig), höhere Kohlenwasserstoffe (flüssig) oder Ammoniak (unter Druck flüssig).

Metallhydride eignen sich wegen ihres hohen Gewichts nicht für den Transport, sondern nur für die stationäre Speicherung.

Die grosse Herausforderung für die Verbreitung von nachhaltigem Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff ist das sogenannte Huhn-Ei-Problem. Die Produktion, die Infrastruktur für die Verteilung und eine allfällige Betankung sowie die Nutzung können nur parallel aufgebaut werden. Dabei geht es nicht nur um die technischen Installationen, die Verfügbarkeit der Technologien in kommerziellen Produkten sowie mögliche Redundanzen¹², sondern auch um das Fachwissen, die Firmen und ihre Geschäftsbeziehungen, die Normierung und Standardisierung, die Gesetzgebung und langfristigen Perspektiven der Investitionen.

Grauer, brauner und grauer Wasserstoff wird heute zu etwa 1.5 € pro kg gehandelt¹³ [11]. Mit einer Bepreisung von CO_2 Emissionen steigt dieser Preis. Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff werden von den Stromkosten dominiert [60]. Die spezifischen Investitionskosten (pro elektrische Leistung) in Elektrolyseure spielen bei den Produktionskosten von Wasserstoff aktuell noch eine grosse Rolle. Das hat auch damit zu tun, dass Elektrolyseure nicht das ganze Jahr in Betrieb sein sollen, sondern nur ein Teil davon, um "Überschussstrom" verwerten zu können. Es wird erwartet, dass die spezifischen Investitionskosten von Elektrolyseuren stark zurückgehen. Elektrolyseure werden zurzeit sehr stark nachgefragt und erreichen immer grössere Massstäbe. Das macht die Technologie in den nächsten Jahren deutlich günstiger und reduziert die spezifischen Investitionskosten in Elektrolyseure (Economy of Scale). Die Stromkosten werden auch auf lange Sicht mehr als die Hälfte der Herstellkosten von Wasserstoff ausmachen [40].

¹² Was macht ein Busunternehmen mit Wasserstoffbussen, wenn die einzige Wasserstoff-Tankstelle eine Störung hat?

¹³ $1.5 \text{ \$/kg} = 0.025 \text{ \$/kWh H}_2 \text{ Brennwert} = 0.030 \text{ \$/kWh H}_2 \text{ Heizwert} = 0.090 \text{ \$/Nm}^3 \text{ H}_2$

2.2 Energiesystem und chemische Energieträger

Hauptverantwortlich für die Klimaerwärmung ist die Nutzung von fossilen Energien in der aktuellen Weltwirtschaft. Ein grosser Teil der Stromproduktion basiert immer noch auf fossilen Quellen¹⁴. Zusätzlich beziehen die Endkunden den grössten Teil der Energie in Form der chemischen Energieträger Benzin, Diesel, Kerosin und Erdgas die zum grössten Teil aus fossilen Quellen stammen. Die Bedeutung von chemischen Energieträgern in den vier Ländern der Bodenseeregion ist in Tabelle 3 gezeigt. Diese Länder haben einen ähnlichen Endenergieverbrauch pro Kopf¹⁵, der ca. 3.2 kW Dauerleistung entspricht¹⁶.

Anteil Endenergieverbrauch im Jahr 2021	Elektrizität	chemische Energieträger	Fernwärme
Schweiz	27 %	67 %	6 %
Fürstentum Liechtenstein	34 %	55 %	12 %
Deutschland	21 %	74 %	5 %
Österreich	21 %	70 %	9 %

Tabelle 3: Anteil am Endenergieverbrauch im Jahr 2021, Quellen: Schweiz [47] Tab. 1 Seite 4/72, Deutschland [52], Österreich [38] Seite 59 (61 von 68), Fürstentum Liechtenstein [33]

In einer langfristigen Betrachtung zeigen die Statistiken einen sinkenden Energieverbrauch in den Ländern der Bodenseeregion. Der Individualverkehr auf der Strasse und die Beheizung der Gebäude werden mit batterie-elektrischen PKWs bzw. Wärmepumpen elektrifiziert, also mit Technologien ersetzt, die um den Faktor drei oder vier effizienter sind. Das führt zusammen mit weiteren Effizienzgewinnen dazu, dass der Energieverbrauch trotz wachsender Wirtschaft weiter abnehmen wird. Die Elektrizität wird eine zunehmende Bedeutung haben und in einem nachhaltigen Energiesystem etwa die Hälfte des Endenergieverbrauchs ausmachen. Alle Prognosen sagen aus, dass chemische Energieträger eine Bedeutung behalten. Sie werden in Gegensatz zu heute erneuerbar sein. Wasserstoff und die damit herstellbaren synthetischen Energieträger sowie Biogas werden eine wichtige Rolle spielen.

Der russische Angriff auf die Ukraine hat die Verwundbarkeit der Lieferketten von fossilen Energien aufgezeigt. Die Marktmechanismen haben die dadurch verursachte Energieknappheit in hohe Energiepreise übersetzt, und zwar auf Werte, die man sich vorher nicht vorstellen konnte. Zudem wurde die Sensibilität für Versorgungssicherheit gestärkt, die mit Massnahmen zur Effizienzsteigerung und der Speicherung von Energie erreicht werden kann. Die Bedeutung der gut speicherbaren und transportierbaren chemischen Energieträger wie verflüssigtes Methan (LNG) ist heute eine ganz andere als vor dieser Krise.

Die Energieträger Elektrizität und Methan werden heute in einer leitungsgebundenen Infrastruktur verteilt. Dabei wird in beiden Fällen zwischen Transportnetz und Verteilnetz unterschieden: Das Transportnetz stellt die weiträumige Verteilung der Energie sicher, das

¹⁴ In der EU wurden im Jahr 2022 etwas mehr als 40 % des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen produziert, etwas weniger als 40% aus fossilen und ca. 20 % in Atomkraftwerken.

¹⁵ Im Jahr 2020: Schweiz: 23.9 MWh/(Pers. · a) = 2.7 kW Dauerleistung, Fürstentum Liechtenstein: 30.6 MWh/(Pers. · a) = 3.5 kW, Deutschland: 27.1 MWh/(Pers. · a) = 3.1 kW, Österreich: 32.3 MWh/(Pers. · a) = 3.7 kW, Quelle: [33]

¹⁶ Der Begriff "2'000 Watt Gesellschaft" stützt sich auf die Primärenergie und nicht auf den Endenergieverbrauch, der hier diskutiert wird.

Verteilnetz bringt die Energie bis zu den Endkunden¹⁷. Für die flüssigen Energieträger gibt es vereinzelt Pipelines¹⁸. Flüssige Energieträger werden in Europa meist mit Tankschiffen oder Trailern transportiert.

2.3 Wasserstoff heute

Heute werden pro Jahr weltweit ca. 100 Millionen Tonnen Wasserstoff verwendet¹⁹. 50 % für Raffinerien und 45 % für die Herstellung von Ammoniak [11]. Weniger als 1 % davon wird aus erneuerbaren Energien erzeugt. Der grösste Teil ist schwarzer, brauner und grauer Wasserstoff (Farben gemäss Tabelle 1 Seite 7) [40].

Zurzeit wird die Produktion von grünem Wasserstoff stark ausgebaut. Trotzdem ist grüner Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff heute noch unbedeutend. Weil unklar ist, welche Rolle grüner Wasserstoff in Zukunft spielen wird, befindet sich der Markt noch in einer frühen Phase. Die Produktion von grünem Wasserstoff lohnt sich bei tiefen Strompreisen und hohen Preisen für die chemischen Energieträger. Weil die erneuerbaren Energien in Europa noch nicht ausreichend ausgebaut sind, sind wegen des Merit-Order-Prinzips die Preise des an den Börsen gehandelten Stroms mit dem Gaspreis und den Preisen der restlichen fossilen Energien gekoppelt. Deswegen wurde die wirtschaftliche Situation für die Produktion von Wasserstoff in der vergangenen Strommangellage schwierig.

Viele Player sind aktuell dabei, Aktivitäten im Bereich des grünen Wasserstoffs aufzubauen, beginnen mit kommerziellen Aktivitäten und bringen sich in Position. So beschäftigen sich die Betreiber der heutigen Gasnetze damit, einen Teil ihrer Netze für Wasserstoff umzurüsten oder eine parallele Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Die Gasnetze sind heute bereit, 10 % Wasserstoff zu transportieren, das dem Methan beigemischt ist. Die entsprechenden Regularien werden gerade angepasst.

¹⁷ Welche Netzebenen des Stromnetzes dem Transportnetz und dem Verteilnetz zugeordnet werden, ist lokal unterschiedlich. Ebenso die Druckstufen im Gasnetz.

¹⁸ Zum Beispiel aus Frankreich zur einzigen Raffinerie der Schweiz in Coreneaux.

¹⁹ [11] spricht von 80 Millionen Tonnen pro Jahr, [40] nennt 117 Millionen Tonnen und beruft sich dabei auf die International Energy Agency (IEA)

3. Die zukünftige Rolle von Wasserstoff

Für grünen Wasserstoff gibt es Anwendungen, welche den Aufbau der neuen Infrastruktur antreiben werden. Andere Anwendungen werden von diesem Aufbau profitieren und die Infrastruktur ebenfalls nutzen. Zudem gibt es Anwendungen, die technisch möglich sind, bei denen sich aber andere Technologien durchsetzen. Welche Anwendungen welche Rolle übernehmen, ist heute noch nicht bekannt.

3.1 Wasserstoff als Energieträger

Im zukünftigen Energiesystem wird grüner Wasserstoff aus erneuerbarem "Überschussstrom"²⁰ produziert. "Überschussstrom" gibt es zum Beispiel an einem sonnigen Wochenende im Sommer, wenn die Nachfrage tief ist und das Angebot an erneuerbarem Strom hoch. Bei funktionierenden Marktmechanismen drückt sich diese Situation in tiefen Preisen aus. Die internationalen Verpflichtungen und die Energiestrategien der vier Staaten der Bodenseeregion²¹ lassen im zukünftigen Energiesystem keine fossilen Kraftwerke und keine Atomkraftwerke zu. Werden die aktuell noch laufenden Kraftwerke durch erneuerbare Energieproduktion ersetzt (besonders durch Photovoltaik und Wind), so wird in Europa in Zukunft noch mehr "Überschussstrom" zur Verfügung stehen. Das ist günstiger Strom, der sich für die Herstellung von Wasserstoff eignet. Wenn in Europa die Kapazitäten zur Produktion von erneuerbarem Strom weiter ausgebaut sein werden, so werden die Preise von an der Börse gehandeltem Strom und die Preise der fossilen chemischen Energieträger Erdgas, Benzin, Diesel und Kerosin nicht mehr gekoppelt sein und die Herstellung von grünem Wasserstoff wirtschaftlich interessanter.

Weil im zukünftigen Energiesystem grüner Wasserstoff aus erneuerbarem "Überschussstrom" produziert wird, ist Wasserstoff keine Alternative zu einem erneuerbaren Energiesystem, sondern ein wichtiger Bestandteil, der die Funktionen der Speicherung und der Energieversorgung von nicht-elektrifizierbaren Anwendungen übernimmt. Der ideologische Streit zwischen Anhängern eines Energiesystem, das ausschliesslich auf Strom und Batteriespeicher basiert und den Anhängern von Wasserstoff und anderen erneuerbaren chemischen Energieträgern sollte der Vergangenheit angehören. Es gibt nämlich keine wissenschaftliche Studie, die aufzeigen kann,²² dass das zukünftige Energiesystem rein auf elektrischer Energie basiert.

²⁰ Das Wort "Überschussstrom" ist nicht klar definiert. Insbesondere wenn dieser "Überschussstrom" von einem Elektrolyseur für die Herstellung von Wasserstoff verwendet wird, ist er nicht mehr "Überschuss".

²¹ Schweizerische Energieperspektive 2050+ [48], Deutsche Energiewende [7], Fürstentum Liechtenstein Energiestrategie 2030, Energievision 2050 [43], Österreichische #Mission2030 [37]

²² Es reicht nicht, wenn eine solche Studie nur die jährliche Produktion und den jährlichen Verbrauch von Strom berücksichtigt. Sie muss das ganze Jahr mit einer Auflösung von Viertelstunden oder Stunden simulieren. Ein Tool des IET für die Schweiz steht online zur Verfügung: www.powercheck.ch.

Aus Wasserstoff können zusammen mit CO₂ Methan, Methanol und höhere Kohlenwasserstoffe produziert werden sowie zusammen mit Stickstoff Ammoniak (Abbildung 2). Biogas besteht aus Methan und ist eine gute Ergänzung. Startet die Produktion aus "Überschussstrom", so ist die Herstellung der chemischen Energieträger mit Verlusten verbunden. Dafür nehmen die Speicherbarkeit und Transportierbarkeit zu. Wegen der guten Transportierbarkeit ist in vielen Energiestrategien der Import von grünem Wasserstoff von ausserhalb Europas vorgesehen. Ob das in Form von Wasserstoff oder in Form eines mit Wasserstoff produzierten Energieträgers aus Abbildung 2 geschieht, ist eine technische und regulatorische Frage. Die Grundidee bleibt gleich, dass chemische Energieträger in Regionen mit tiefen Stromkosten oder mit grosser Verfügbarkeit von Biomasse produziert und dann importiert werden. Die chemischen Energieträger können direkt verwendet oder in Wasserstoff umgewandelt werden.

Nachhaltige Energieträger

- Elektrizität
- Wasserstoff H₂
- Methan CH₄
- Methanol CH₃OH
- höhere Kohlenwasserstoffe
- Ammoniak NH₃

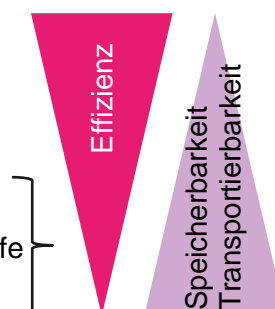


Abbildung 2: Effizienz in der Herstellung verschiedener nachhaltiger Energieträger aus Strom im Vergleich mit Speicherbarkeit und Transportierbarkeit.

Wasserstoff wird in Zukunft über zwei Pfade zur Verfügung gestellt werden: Aus lokalen Anlagen für die Verwertung von Überschussstrom. Weil die möglichen Mengen für eine Wirtschaft komplett ohne fossile Quellen nicht ausreichen, braucht es mittelfristig den Import aus Regionen mit tiefen Kosten für erneuerbaren Strom. Während die lokalen Quellen bereits jetzt erschlossen werden können, werden die Importkapazitäten erst in ein paar Jahren zur Verfügung stehen.

Bei der energetischen Verwendung von Wasserstoff, steht die flammenlose Oxidation in Brennstoffzellen zu Strom und Wärme im Vordergrund. Dies geschieht in den aktuell in Europa verfügbaren Wasserstoff-Fahrzeugen²³ mit Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die von der Autoindustrie in Grossserie produziert werden und auch für andere Nutzungen zur Verfügung stehen [55]. Wasserstoff kann auch in speziellen Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen²⁴ oder in stationären Verbrennungsmotoren als Blockheizkraftwerk²⁵ genutzt werden. Die reine Wärmenutzung in Brennern ist technisch ebenfalls möglich²⁶.

Es ist sinnvoll, Wasserstoff und die anderen chemischen Energieträger in schwierig zu elektrifizierenden Anwendungen einzusetzen. Man kann heute jedoch nicht sagen, in welchen Anwendungen welcher Energieträger verwendet wird. Viele Studien zeigen eine ganze Bandbreite von Szenarien mit unterschiedlicher Verbreitung von Wasserstoff [48] [60]. Eine

²³ Die englische Bezeichnung für Wasserstoff-Fahrzeuge beschreibt diese Verwendung sehr gut: Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles (HFCEV).

²⁴ Die Effizienz von Brennstoffzellen und grossen Verbrennungsmotoren (sowohl Diesel als auch Wasserstoff), die im optimalen Betriebspunkt laufen, ist ähnlich.

²⁵ BHKW Produktion von Wärme und Strom. Wird typischerweise dann betrieben, wenn ein Wärmebedarf besteht, also im Winter wenn möglicherweise eine "Winterstromlücke" entstehen kann. Wird in der Schweiz als Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) bezeichnet, in Deutschland als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

²⁶ Ob die reine Wärmenutzung von Wasserstoff wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist, wird zurecht oft in Frage gestellt, z.B. in den These 5 des Schweizerischen Bundesamts für Energie [49], siehe auch Fussnote 38 Seite 17 in diesem Dokument.

Zuordnung nach rein objektiven und wissenschaftlichen Kriterien ist nicht möglich, weil nicht alle Effekte in einer solchen Analyse berücksichtigt werden können und sich die Technologien ständig weiterentwickeln. Diese Weiterentwicklungen hängen davon ab, ob sich Unternehmen oder andere Organisationen für gewisse Technologien engagieren. Nur so entstehen Stückzahlen, können Technologien reifen, kann Know-how aufgebaut werden und können Produkte dank der "Economy of Scale" günstiger werden. In einer liberalen Wirtschaftsordnung kann der Preis darüber entscheiden, wo Wasserstoff und die anderen chemischen Energieträger eingesetzt werden. Die Aufgabe der politischen Institutionen ist es, die Randbedingungen festzulegen und Greenwashing zu verhindern.

Wir diskutieren kurz Anwendungen für grünen Wasserstoff und für die anderen erneuerbaren chemischen Energieträger sowie ihre technischen Alternativen:

Fahrzeuge: PKWs, LKWs und Busse: Es existieren weltweite Standards für die Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff auf 350 bar und 700 bar. Im Bereich der PKWs werden sich in Europa batterie-elektrische Fahrzeuge sehr stark durchsetzen. Bei LKWs und Bussen existieren unterschiedliche Anforderungen und Kriterien²⁷. Für einige Anwendungen sind batterie-elektrische Fahrzeuge sehr geeignet, für andere nicht. Der Bereich der Wasserstoff-LKWs entwickelt sich aktuell sehr dynamisch [32]. Die Verwendung von 100% Biodiesel²⁸ ist für viele Transportanwendungen ohne Probleme und ohne wesentlichen Mehrkosten sofort umsetzbar. Das Potential von Biodiesel ist aber beschränkt.

Schiffe: Für neu gebaute Schiffe mit der Anforderung einer gewissen Reichweite ist der Wasserstoffantrieb interessant. Für Umbauten von existierenden Schiffen ist Wasserstoff wegen der hohen Sicherheitsanforderungen eine grosse Herausforderung. Bei geringen Anforderungen an die Reichweiten werden erste batterie-elektrische Schiffe eingesetzt [62], auch auf dem Bodensee [4] zur vollen Zufriedenheit der Betreiber. Ein Verkehr in Längsrichtung des Bodensees ist wegen der geforderten Reichweite (inklusive Sicherheitsmarge) nur mit chemischen Energieträgern möglich, auch wenn Batterien in den nächsten Jahren noch viel besser werden. Aus der Branche ist zu hören, dass heute keine reinen Dieselschiffe mehr ausgeschrieben werden.

Flugzeuge: Die einfachste Möglichkeit für eine erneuerbare Luftfahrt sind Biofuels und E-Fuels. Auch diese Umstellung ist wegen der hohen Sicherheitsanforderungen und der strengen Regularien in der Luftfahrt eine grosse Herausforderung. Für Kleinflugzeuge und kurze Strecken gibt es Projekte von batterie-elektrisch angetriebenen Flugzeugen. Für grosse Reichweiten werden langfristig mit Wasserstoff angetriebene Flugzeuge diskutiert. Die Entwicklungszeit für solche Flugzeuge ist aber sehr lange.

Industrie: Prozesswärme: Für Temperaturen bis 180 °C können für einige Anwendungen Hoch- und Höchsttemperatur Wärmepumpen [1] oder Solarkollektoren [44] verwendet werden. Für höhere Temperaturen kann in den bestehenden Erdgas-Anlagen Biogas verwendet werden. Alternativen sind Biomasse-Feuerungen (z.B. Holz) oder aus grünem Wasserstoff gewonnene Brenn- und Treibstoffe Methanol, Ammoniak und die höheren Kohlenwasserstoffe.

²⁷ In einer Studie zum Europäischen Schwerlastverkehr auf der Strasse [21] wurden neben den Kosten (beeinflusst durch den Wirkungsgrad) auch die folgenden Kriterien identifiziert: Verfügbarkeit der Fahrzeuge, Tanksäulen und Kompressoren, Erforderlicher Aufwand für die Infrastruktur, Auswirkungen auf das Energiesystem, Potential der Energiequelle und praktische Aspekte wie Ladezeiten und Sicherheitsanforderungen.

²⁸ Biodiesel ist Fettsäuremethylester (FAME).

Notstromaggregate, Spitzenlastdeckungen, Bewältigung von Strommangellagen: Bei diesen Anwendungen wird nur wenig Energie benötigt, nämlich nur im Notfall, der selten eintreten sollte. Deswegen spielen die Kosten für die Treibstoffe nur eine untergeordnete Rolle. Der letzte Winter hat gezeigt, dass die Möglichkeit, im Notfall Strom zu erzeugen, auch einen Wert hat, auch wenn dieser Notfall effektiv nie eintritt.

3.2 Wasserstoff als Rohstoff

Wasserstoff ist ein wichtiger Rohstoff in der Stahlproduktion, bei der Produktion von chemischen Grundstoffen wie Methanol und in der Herstellung von Ammoniak vor allem als Dünger. Der Bedarf an Wasserstoff der Stahlindustrie, der Grundstoffindustrie und der chemischen Industrie wird heute aus den fossilen Rohstoffen Kohle (zusammen mit Wasser), Erdgas und Erdöl gedeckt. Im Gegensatz zur energetischen Verwendung von Wasserstoff gibt es in einer nachhaltigen Wirtschaft für den Rohstoff Wasserstoff keine Alternativen zum grünen Wasserstoff [11]. Es gibt deutlich weniger Studien zu grünem Wasserstoff als Rohstoff als zu seiner Rolle als Energieträger.

3.3 Wasserstoff-Technologien als Produkte

Im Bodenseeraum gibt es zahlreiche, innovative Industrieunternehmen, für die grüner Wasserstoff nicht nur ein Energieträger und Rohstoff sein kann. Die Technologien und Services für Wasserstoff entlang der ganzen Wertschöpfungskette können Produkte darstellen, die im In- und Ausland angeboten werden können. Die Nachfrage danach steigt aktuell sehr stark.

3.4 Global

Im Kontext dieser Kurzstudie lassen sich auf globaler Ebene die folgenden Aktivitäten feststellen, die sich auch auf den Bodenseeraum auswirken²⁹:

- Es werden kommerzielle hochspezialisierte Produkte verfügbar: Elektrolyseure unterschiedlicher Technologien³⁰, Brennstoffzellen, PKWs und LKWs aktuell noch aus Asien³¹ sowie Busse, Wasserstoffspeicher, Kompressoren, Wasserstoff-Tankstellen und weiteres Zubehör sowie Dienstleistungen wie z.B. Zertifizierungen. Trotzdem sind aktuell gewisse Produkte schwierig verfügbar.
- Einige Firmen mit Wasserstoff-Technologien wachsen [12], werden übernommen und bilden neue Konzerne [36]. Etablierte Firmen mit einer langen Tradition im Geschäft mit fossilen Energieträgern und Rohstoffen bauen Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und den anderen chemischen Energieträgern aus [45] [54].

²⁹ Die Liste ist nicht vollständig oder repräsentativ und spiegelt die subjektive Wahrnehmung des Autors

³⁰ Alkalische Elektrolyseure, Proton Exchange Membrane (PEM), Anion Exchange Membrane (AEM) und Hochtemperatur Elektrolyseure.

³¹ Aus Gesprächen mit H2 Energy und Postauto Schweiz vor fünf Jahren ist dem Autor bekannt, dass damals die Europäische Autoindustrie kein Interesse an einer Kommerzialisierung von Wasserstoff LKWs und Bussen hatte.

- Die Industrie sieht eine stark zunehmende globale Nachfrage nach Produkten in den Bereichen Wasserstoff und alternative Treibstoffe.³²
- Es gibt zahlreiche Umsetzungsprojekte, sowohl gefördert von Regierungen als auch auf privater Basis³³. Gemäss International Energy Agency (IEA) übersteigen weltweit die Investitionen in erneuerbare Energien diejenigen in fossilen Energien [30].
- Es werden Kooperationen bekannt gegeben, um Wasserstoff in sonnenreichen Ländern zu produzieren und nach Europa zu importieren (z.B. [23] Import in Form von Ammoniak).

3.5 Europa

Seit vielen Jahren finanziert die EU eines der weltweit grössten Forschungsprogramme im Bereich Wasserstoff³⁴. Seit Juli 2020 hat die EU mit der Kommunikation der europäischen Kommission zum Thema Wasserstoff [15] eine offizielle Strategie, die "einen klaren Investitionsplan durch die neu gegründete "European Clean Hydrogen Alliance" vorsieht. Das Thema ist dabei in den "European Green Deal" eingebettet und daher als Zukunftsthema der europäischen Politik fest verankert." [40] Die EU fördert auch über ihre Mitgliedstaaten "Important Projects of Common European Interest" (IPCEI³⁵) unter anderem im Bereich Wasserstoff³⁶, wo im Jahr 2022 mit "IPCEI Hy2Tech" und "IPCEI Hy2Use" zwei Grossvorhaben gestartet wurden, die von Mitgliedländern mit jeweils über 5 Milliarden € gefördert werden und weitere Beteiligungen von jeweils ca. 8 Milliarden € beinhalten.

Eine wichtige europäische Aktivität ist seit 2020 der "[European Hydrogen Backbone](#)", eine Initiative von 32 Betreibern von Energieinfrastruktur. Es wird eine Infrastruktur geplant, bestehend aus Transportleitungen für Wasserstoff. Ihr aktueller Bericht vom April 2022 [19] macht konkrete Vorschläge für europäische Transportkorridore von Wasserstoff, Produktionskapazitäten, Speicher, Terminals und mögliche Abnehmer. Eine aktualisierte Version ist [online](#) verfügbar. Eine europäische Karte mit Infrastrukturprojekte bis 2030 ist in Abbildung 3 gezeigt (Ausschnitt erweiterte Bodenseeregion in Abbildung 6). In der online Version können Projekte bis 2030, bis 2040 und bis 2050 eingeblendet werden. Es fällt auf, dass abgesehen von Speichern, praktisch alles bis 2030 realisiert werden soll.

Europa hat seit 2019 zahlreiche "Hydrogen Valleys" etabliert [16]. Das sind Gebiete, in denen die ganze Wertschöpfungskette von Wasserstoff abgebildet und erforscht wird. Im März 2023 wurde die Absicht bekräftigt, dieses Programm weiter zu verstärken [27]. Zudem werden Wasserstofftechnologien auf europäischer Ebene standardisiert [17], was eine Erleichterung bei der Umsetzung von Wasserstoffprojekten darstellt.

Eine Auswahl an länderübergreifenden Initiativen:

3H₂: Anfang 2022 haben die regionalen Klimaschutzorganisationen, die Energieversorger und die Handelskammern aus dem Dreiländereck Frankreich-Schweiz-Deutschland die

³² Gespräche des Autors mit verschiedenen, global agierenden Firmen aus der Schweiz.

³³ Beispiele: [National Clean Hydrogen Strategy](#) (USA), [Wasserstoff-Begleitboote am 37. America's Cup 2024 in Barcelona](#).

³⁴ In der Organisation "Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking", die im November 2021 in die "[Clean Hydrogen Partnership](#)" übergegangen ist.

³⁵ ehemals Project of Common Interest (PCI)

³⁶ Die anderen Themen sind Mikroelektronik, Hochleistungscomputer, Batteriezellfertigung, Vernetzte, saubere und autonome Fahrzeuge, Smart Health, CO₂-arme Industrie, Internet of Things und Cybersecurity.

Trinationale Wasserstoff Initiative 3H₂ gegründet. Die Organisation hat die Vision, den Anschluss an das europäische Versorgungsnetz für grünen Wasserstoff vorwärtszubringen. Die Initiative möchte eine nachhaltige, grenzüberschreitende Wasserstoffwirtschaft entwickeln und bis zum Jahr 2035 eine Wasserstoffinfrastruktur in der Grenzregion Deutschland-Frankreich-Schweiz realisieren.

GRH: Im August 2021 haben drei Gasnetzbetreiber und ein Wasserstoffproduzent aus dem Saarland, der Lorraine und Luxemburg die Grande Region Hydrogen (GRH) gegründet, um Synergien von Wasserstoffprojekten zu nutzen.

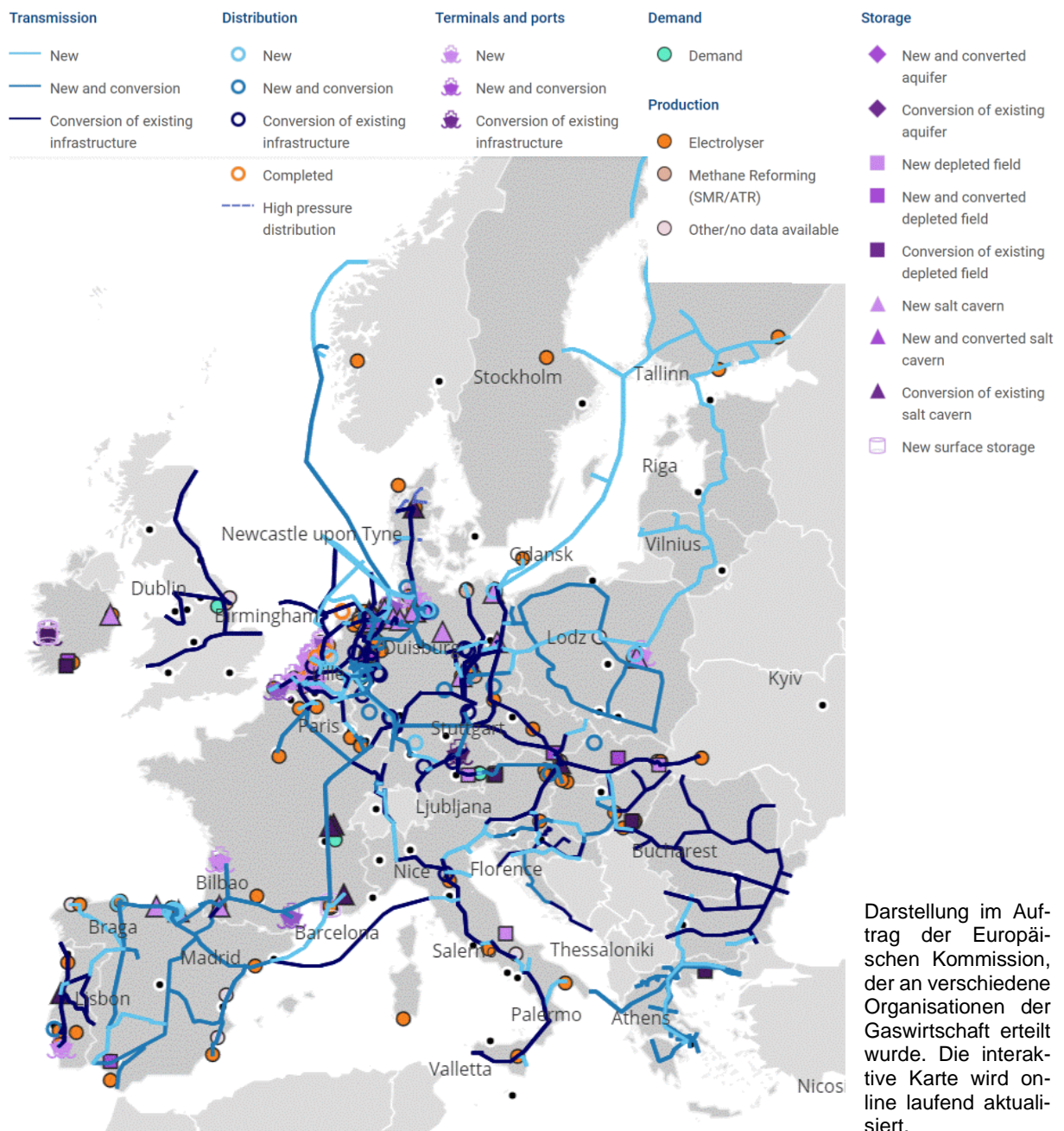


Abbildung 3: Planungsstand der Europäischen Wasserstoff Infrastruktur im Jahr 2030. [25]

4. Wasserstoff in der Bodenseeregion

4.1 Schweiz

Die Schweiz hat im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern noch keine nationale Wasserstoffstrategie³⁷. In der "Energieperspektive 2050+" des Bundes [48] ist vorgesehen, dass Wasserstoff eine wichtige Rolle spielen wird und nicht nur in der Schweiz produziert, sondern auch importiert werden soll. Das Schweizerische Bundesamt für Energie (BFE) hat im September 2022 neun Thesen veröffentlicht [49]³⁸. Darauf aufbauend entwickelt das BFE zusammen mit den Branchen eine Wasserstoffstrategie sowie eine Wasserstoff Roadmap. Die Wasserstoffstrategie soll Ende 2024 abgeschlossen werden. Als Teil dieser Aktivitäten hat das BFE im Mai 2023 versucht, den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff abzuschätzen. Eine Umfrage bei Unternehmen hat ergeben, dass "keine robuste Abschätzung des zukünftigen Bedarfs" in der Industrie möglich ist³⁹.

Die führenden Branchenorganisationen aus dem Energiebereich sehen Wasserstoff ebenfalls als wichtigen Pfeiler einer zukünftigen Energieversorgung: Der Verband der Schweizerischen Elektrizitätsunternehmen VSE liess eine breit abgestützte ausführliche Studie "Energiezukunft 2050" durchführen [57]. In Bezug auf Wasserstoff kommt die Studie zum Schluss, dass "Wasserstoff (...) zu einem essenziellen Element der schweizerischen Energieversorgung werden" kann und dabei ein Anschluss an die europäische Wasserstoffinfrastruktur wichtig ist. Der Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG stellt fest [56], dass "Wasserstoff (...) bei der Dekarbonisierung der Energieversorgung eine zentrale Rolle" spielt. Bis 2050 wird es in der Schweiz Gasnetze für Methan und Wasserstoff geben, die nur noch erneuerbare Gase transportieren. Avenergy⁴⁰ fördert die Anwendung von Wasserstoff im Zusammenspiel mit biologischen und synthetischen Brenn- und Treibstoffen [2].

Eine aktuelle Studie der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz über das Schweizer Energiesystem im Jahr 2050 kommt zum Schluss, dass es grosse Mengen an Wasserstoff und synthetischem Treibstoff braucht, damit die Schweiz klimaneutral werden kann. "Die Herstellung synthetischer Treibstoffe ist unabdingbar, weil es für die Luftfahrt und den Schwerkverkehr Treibstoff mit hoher Energiedichte braucht." [5]

Der Verband der Schweizerischen Elektrizitätsunternehmen VSE und der Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG haben im September 2023 gemeinsam eine Studie [60] veröffentlicht mit dem Ziel, "die Rahmenbedingungen für Geschäftsmodelle im Bereich Wasserstoff zu untersuchen, sinnvolle Instrumente eines Regulierung- und Förderrahmens zu

³⁷ Das Schweizerische Bundesamt für Energie (BFE) wurde am 12. Dezember 2022 mit der Annahme der [Motion 22.3376 "Strategie für Wasserstoff in der Schweiz"](#) durch den Nationalrat als Zweittragt mit er Erarbeitung einer Wasserstoffstrategie beauftragt.

³⁸ Die Thesen lauten: 1. "Wasserstoff leistet einen Beitrag für die Erreichung des Netto-Null-Ziels 2050", 2 "Die Schweiz setzt auf «grünen» Wasserstoff aus erneuerbaren Energien, 3 "Die Produktion von grünem Wasserstoff erfordert den Zubau von erneuerbaren Energien.", 4 "Wasserstoff wird in der Schweizer Energieversorgung in Zukunft dort verwendet, wo es wirtschaftlich und ökologisch am sinnvollsten ist.", 5 "In der Wärmeversorgung wird «grüner» Wasserstoff nur dann eingesetzt, wenn es keine erneuerbaren Alternativen gibt.", 6 "Die Planung der saisonalen Speicherung von «grünem» Wasserstoff muss frühzeitig angegangen werden.", 7 "Für den Import von «grünem» Wasserstoff braucht es einen internationalen Marktzugang und ein Register mit Herkunftsnachweisen.", 8 "Für den Transport des Wasserstoffs muss in der Schweiz ein Vertriebssystem aufgebaut werden.", 9 "Forschung und Entwicklung bleiben wichtig."

³⁹ Persönliche Kommunikation mit Swissem und SVGW.

⁴⁰ Bis 2019 hiess Avenergy "Schweizerische Erdölvereinigung".

identifizieren und Hinweise zur Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen für Wasserstoff im Zeitverlauf zu geben." Dabei wurde die Anwendung von grünem Wasserstoff untersucht für die energetische Nutzung als Treibstoff, zum Heizen, für Prozesswärme und für die Stromerzeugung bei Engpässen. Die Autorinnen und Autoren finden, dass im Jahr 2040 in der Schweiz hergestellter Wasserstoff günstiger ist als importierter. Ersterer kann die schweizerische Nachfrage bei weitem nicht abdecken, weswegen importierter Wasserstoff wichtig wird. Dieser wird erst zwischen 2040 und 2050 günstiger sein als inländisch produzierter Wasserstoff. Die Studie schlägt Massnahmen für die Anfangsphase der Wasserstoffwirtschaft vor sowie für spätere Phasen, wenn der Markt spielt und die Importkapazitäten vorhanden sind.

In der Schweiz sind aktuell fast 50 Wasserstoff-Lastwagen im Einsatz, die an aktuell 15 Tankstellen [29] grünen Wasserstoff tanken, der aus zwei Produktionsanlagen [29] mittels Container angeliefert wird. Das ist die grösste kommerzielle Flotte an Lastwagen in Europa. Zwei der Tankstellen⁴¹ und eine der Produktionsstandorte⁴² befinden sich in oder nahe der Stadt St.Gallen. Nach öffentlicher Förderung ganz am Anfang⁴³, wird diese Initiative unterdessen aus privatwirtschaftlichen Mitteln von Firmen und Organisationen aus der Privatwirtschaft⁴⁴ getragen. Dabei spielt die Firma [H2 Energy](#) eine tragende Rolle und ist beteiligt an [H2 Energy Europe](#), [Hydrospider](#), [Hyundai Hydrogen Mobility](#) und [Verconex](#). In dieser Konstellation ist es gelungen, das Huhn-Ei Problem anzugehen, also Produktion, Verteilung und Verbrauch von Wasserstoff parallel aufzubauen.

Aus Schweizer Sicht konnte im Sommer 2023 ein wichtiges Resultat erzielt werden: Die Firma Transitgas wurde Mitglied im [European Hydrogen Backbone](#) und konnte erreichen, dass eine Wasserstoff-Transitleitung durch die Schweiz, die im ursprünglichen Konzept der europäischen Wasserstoffkorridore erst ab 2040 vorgesehen war [19], vorverschoben und in die Planung für das Jahr 2030 aufgenommen wird (vergleiche Abbildung 3 Seite 16 und Abbildung 5 Seite 21). Diese Transitgasleitung besteht heute schon für Methan und kann dieses von Nord nach Süd und von Süd nach Nord transportieren (Reverse Flow). In den Teilstücken, wo sie doppelt ausgeführt ist, kann eine Leitung auf Wasserstoff umgewidmet werden. Der Teilbereich mit einfacher Leitungsführung kann im gleichen Stollen um eine zusätzliche Wasserstoffleitung ergänzt werden. Transitgas arbeitet aktuell intensiv an den Vorbereitungen. Bei der Erarbeitung der Wasserstoffstrategie wird ein mögliches schweizerisches Wasserstoffnetz für die Ein- und Ausspeisung von Wasserstoff ausgehend von dieser Transitleitung angedacht⁴⁵.

In der Schweiz sind Wasserstoff-LKWs zusammen mit batterie-elektrischen LKWs von der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) befreit unabhängig davon, ob sie mit erneuerbarer Energie oder mit fossiler Energie betrieben werden (vergleiche "Farbe" von Wasserstoff in Tabelle 1 Seite 7). Zudem dürfen solche LKWs länger und schwerer sein.

⁴¹ Beide von AVIA Osterwalder, eine in der Stadt St.Gallen, eine in Gossau.

⁴² Die Anlage beim Kraftwerk Kubel im Sittertobel mit einer elektrischen Leistung von 2 MW wurde im Auftrag der [Wasserstoffproduktion Ostschweiz AG](#) gebaut und wird von ihr betrieben. Das Unternehmen wurde von [Avia Osterwalder](#), den [St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerken AG \(SAK\)](#) und [SN Energie AG \(SNEE\)](#) im Jahr 2022 gegründet.

⁴³ Zwei vom Bundesamt für Energie geförderte Pilot- und Demonstrationsprojekte von 2015 bis 2019: "[Construction and operation of the first hydrogen refilling stations in Switzerland with a nominal pressure of 70MPa](#)" und "[Nachhaltiger Wasserstoff aus Wasserkraft für die Mobilität – ein dezentrales Konzept für eine etappenweise Verbreitung](#)"

⁴⁴ Die Organisationen dieser Initiative sind [Hydrospider](#), [Förderverein H2 Mobilität Schweiz](#), [H2 Energy](#) und [Hyundai Hydrogen Mobility](#).

⁴⁵ Persönliche Kommunikation mit Swissem und SVGW.

Eine Auswahl weiterer Initiativen, die für die Bodenseeregion relevant sein können:

Der [Tech Cluster Zug](#), die Unternehmen V-Zug, Amag, der Energieversorger Zug (WWZ), die Zuger Verkehrsbetriebe, die Cham Group (Immobilien) und Siemens verfolgen das Ziel, die Industrie zu dekarbonisieren. Dabei soll in Zukunft in einem Industrieareal photovoltaischer Strom erzeugt, Überschussstrom in Wasserstoff umgewandelt und Methan (Erdgas oder Biogas) mittels Pyrolyse in türkisen und grünen Wasserstoff (Farben gemäss Tabelle 1 Seite 7) sowie Kohlenstoff zerlegt werden. Zudem gibt es eine Partnerschaft mit Oman mit dem Ziel, in Zukunft in Oman grünen Wasserstoff und daraus synthetisches Methan zu produzieren und es in die Schweiz zu importieren [3].

Getec möchte im [Getec Park Swiss](#) in Muttenz einen Import Hub für grünen Wasserstoff aufbauen [23].

Die Karten der zukünftigen Wasserstoff Infrastruktur in Abbildung 3 Seite 16 und Abbildung 6 Seite 23 zeigen, dass die Erdgasspeicher in Etrez im französischen Jura bis 2030 auch Wasserstoff speichern können. Heute nutzt die Schweiz basierend auf einem Staatsvertrag mit Frankreich in den Salzkavernen von Etrez Speicherkapazitäten für Methan.

Unabhängig von der oben erwähnten Initiative von [H2 Energy](#), hat die Kehrlichtverbrennungsanlage Buchs (SG) im St. Galler Rheintal ein Baugesuch für den Bau einer Wasserstoffproduktion eingereicht.

Die [Parlamentarische Gruppe "Wasserstoff"](#) wurde im März 2021 gegründet und hat sich im Jahr 2022 umbenannt in [Parlamentarische Gruppe "Wasserstoff/Power-to-X"](#)⁴⁶. Sie bringt damit zum Ausdruck, dass sich Wasserstoff und andere chemische Energieträger ergänzen werden.

Der Bau von Wasserstoffleitungen wird standardisiert. Es existiert dazu eine neue Empfehlung des Schweizerischen Verband des Gas- und Wasserfaches SVGW [50].

Im Hafen von Birsfelden wird ein "H2 Hub" und eine Wasserstoffproduktion mit 15 MW elektrischer Leistung geplant [24].

4.2 Fürstentum Liechtenstein

In der Energiestrategie 2030 und Vision 2050 [43] wird Wasserstoff nur kurz erwähnt als Treibstoff und als saisonaler Speicher. Das Gasnetz des Fürstentums Liechtenstein ist jung im Vergleich mit anderen Gasnetzen, die zum Teil 150-jährige Bauteile enthalten. Weil die verwendeten Materialien sehr modern sind, ist das Gasnetz im Fürstentum Liechtenstein bereit, Wasserstoff zu transportieren. Wie in der Schweiz sind Wasserstoff-LKWs von der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) befreit [22]. Die Energiekommission unter der Leitung der zuständigen Regierungsrätin Sabine Monauni informiert sich im Herbst 2023 über die Möglichkeiten von Wasserstoff.

⁴⁶ [Lobbywatch](#)

4.3 Deutschland

Die Wasserstoffstrategie von Deutschland [6] ist vom Juni 2020 und wird gemäss einem Entscheid vom Juli 2023 weitergeführt. Die Massnahmen entlang des Energiestroms sind 1. Hochlauf für Produktion und Import von grünem Wasserstoff, 2. Aufbau einer nationalen Infrastruktur mit dem Wasserstoff-Kernnetz von 12'000 km Länge bis 2032 und 3. Förderung von grünem Wasserstoff inklusive seiner Anwendung in der Industrie. "Die Bundesregierung sieht bis 2030 einen Wasserstoff bedarf von ca. 90 bis 110 TWh." [6].

Die Deutsche Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. ist dabei, im Rahmen der zweiten Massnahme der deutschen Wasserstoffstrategie [6] ein Kernnetz für Wasserstoff zu planen. Für die aktuellen Pläne [8] gab es im Sommer 2023 ein Vernehmlassungsverfahren. Abbildung 4 zeigt die für das Jahr 2032 prognostizierten Einspeiseleistungen und Ausspeisemengen von Wasserstoff. Abbildung 5 zeigt das Kernnetz mit Planungsstand von Juni 2023.

Grün: Einspeiseleistungen für Wasserstoff auf Kreisebene sowie an Grenzübergangspunkten

Rot: Ausspeisemengen für Wasserstoff auf Kreisebene im Szenario für das Wasserstoff-Kernnetz

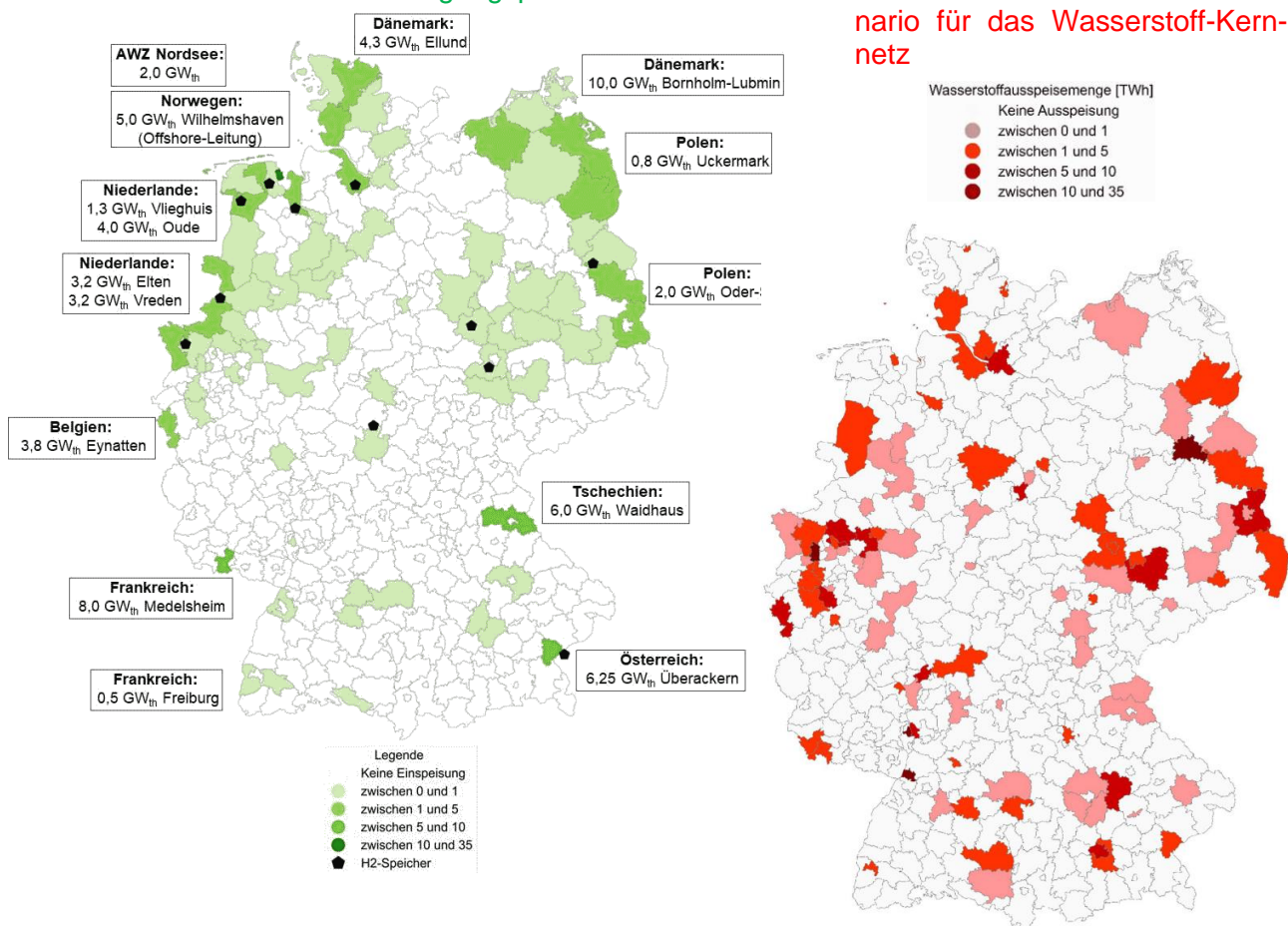


Abbildung 4: Einspeisemengen (grün) und Ausspeisemengen (rot) von Wasserstoff im Jahr 2032 gemäss Planung der Fernleitungsnetzbetreiber, Angaben in TWh pro Jahr als Brennwert [8] Abbildung 1 Seite 12/29, Abbildung 2 Seite 14/28.

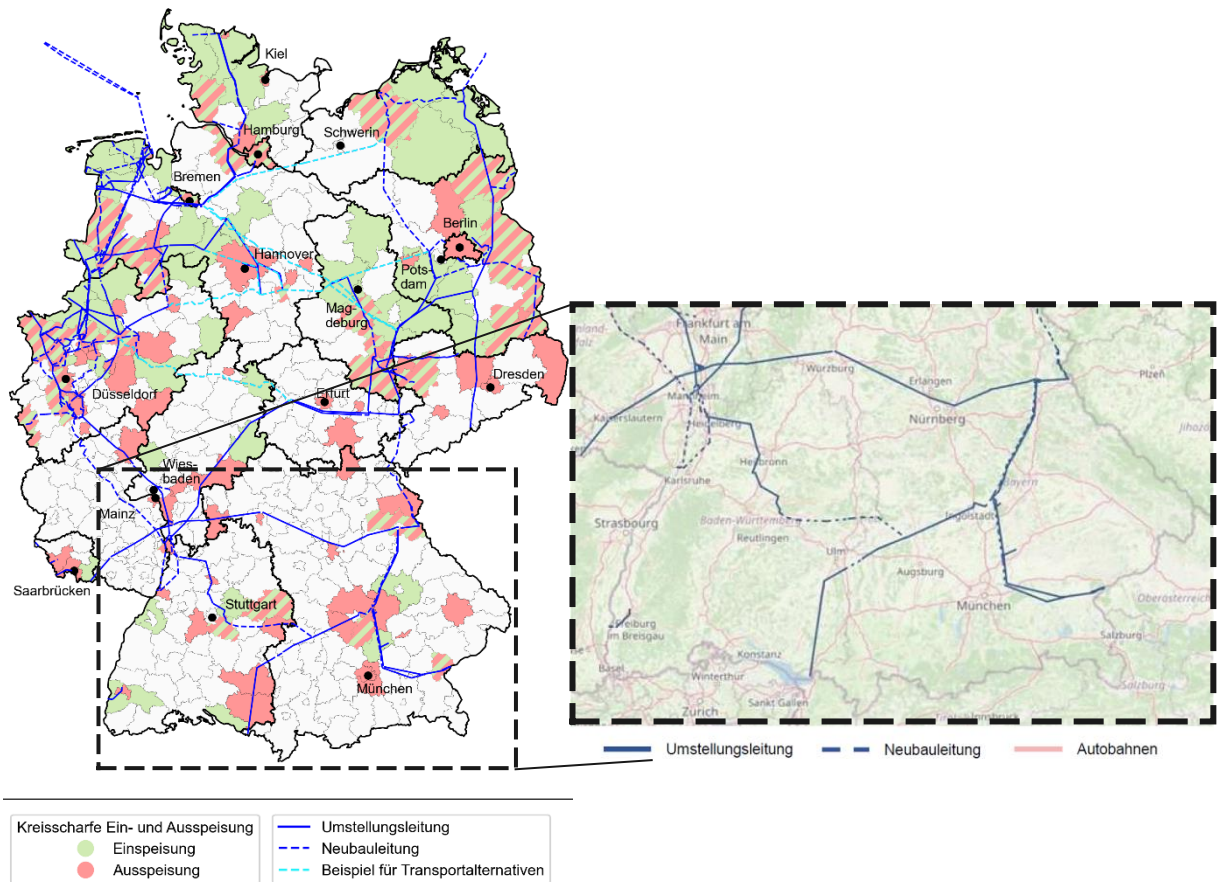


Abbildung 5: Planungsstand Wasserstoff-Kernnetz Juli 2023 mit möglichen Einspeise- und Ausspeiseorte gemäss Abbildung 4. [8] Abbildung 4 Seite 19/29, Abbildung 9 Seite 25/28.

Die lokale Versorgung des Südwestens Deutschlands mit Wasserstoff aus Biomasse und Solarenergie wurde im Jahr 2016 untersucht [59]. Unter dem Namen HyAllgäu sind verschiedene Studien zu finden, [10] [35] [61], die von zahlreichen Landkreisen und Gemeinden unterstützt wurden. Eine breite Allianz von Akteuren untersucht Möglichkeiten der lokalen Produktion von Wasserstoff und ihrer Verwendung sowohl technisch als auch wirtschaftlich und möchte konkrete Projekte umsetzen.

In der Nähe des Bodensees gibt es in Deutschland gemäss zwei interaktiven Karten in Geisingen und in Freiburg Wasserstofftankstellen [26], jedoch keine Wasserstoffproduktion, die aktuell in Betrieb ist [13]. Dem Autor ist nicht bekannt, ob diese Karte aktuell ist.

4.4 Österreich

Österreich hat seit dem Sommer 2022 eine Wasserstoffstrategie [39]. Die beiden Projekte "SouthH2 Corridor" [51] und "H2EU+Store" [41] bewerben sich als "Important Projects of Common European Interest" (IPCEI, Kapitel 3.5 Seite 15) und können in Zukunft ein österreichisches Wasserstoff-Kernnetz bilden sowie den Import von grünem Wasserstoff aus Nordafrika und Osteuropa erlauben.

Die [Wirtschaftskammer Vorarlberg](#), Mitauftraggeberin der vorliegenden Studie, hat im Jahr 2021 eine Kurzstudie [11] in Auftrag gegeben, die sich auf fünf Industrieunternehmen⁴⁷ fokussierte. Gemäss Kurzstudie kommt im Vorarlberg der Einsatz von Wasserstoff für Prozesswärme und für den Gütertransport auf der Strasse in Frage. Diese Anwendungen können auch mit den Energieträgern Elektrizität und Biomasse bewerkstelligt werden.

Das Vorarlberg ist in Lindau an das deutsche Gasnetz angeschlossen und via den Arlberg mit den Gasnetzen des restlichen Österreich verbunden (Abbildung 10 Seite 24).

4.5 Bodenseeregion

Der Planungsstand für eine zukünftige Wasserstoff-Infrastruktur in der erweiterten Bodenseeregion ist in Abbildung 6 als Ausschnitt aus Abbildung 3 dargestellt. Zudem ist die Transitleitung durch die Schweiz eingezeichnet, die bis 2030 mit einem Methanstrang und einem Wasserstoffstrang ausgerüstet wird (Kapitel 4.1 Seite 17). Die Gastransportnetze für Methan nördlich des Bodensees, im Vorarlberg, in der Ostschweiz und im Fürstentum Liechtenstein sind in Abbildung 7 bis Abbildung 10 dargestellt. Ein Vergleich der Karten ergibt das folgende Bild:

- Es ist vorgesehen, dass im Bodenseeraum in Lindau bis 2030 die Europäische Wasserstoffinfrastruktur die Bodenseeregion erreicht und grüner Wasserstoff in die Region gebracht werden kann.
- Die Region Schaffhausen mit der Gas-Übergabestation Fallentor soll gemäss aktuellen Plänen nicht mit Wasserstoff versorgt werden.
- Im Rheintal existieren beidseits des Rheins Transportleitungen für Methan: Auf der österreichischen Seite eine Leitung aus den 1980er Jahren mit 64 bar. Auf der schweizerischen Seite eine Leitung mit 40 bar, die in den 2000er Jahren auf Methan umgerüstet wurde. Es ist ein Teilstück der nicht mehr benötigten Ölleitung "Oleodotto del Reno" (auch: Central European Line, CEL) zwischen Genua und Ingolstadt. Zwischen Bodensee und Chur existiert somit eine doppelte Hochdruck-Infrastruktur für Methan. Hier bietet sich die Möglichkeit, einen Strang auf Wasserstoff umzuwidmen, sodass das Rheintal von Norden her über Lindau mit Wasserstoff versorgt werden kann.
- Ein weiter Abschnitt der ehemaligen Ölleitung vom italienischen Verderio über den Splügenpass nach Thusis ist aktuell ungenutzt. Es gibt Bestrebungen, im Stollen eine Stromleitung zu installieren, was noch nicht umgesetzt wurde. Es wäre zu untersuchen, ob diese Leitung auf Wasserstoff umgerüstet werden kann.

⁴⁷ [Blum Beschläge](#) (Möbelbeschläge), [Collini](#) (Oberflächenbeschichtungen: Galvanisieren, Anodisieren, Feuerverzinken und Pulverbeschichten), [Getzner Textil](#) (Bekleidungsdamaste, Modestoffe und technische Textilie), [Ölz Meisterbäcker](#) (Hersteller von Backwaren, Toast- und Sandwichbrot) und [Rondo Ganahl](#) (Hersteller von Wellpappe-Verpackungen, Wellpappe-Rohpapieren und Rohstoffverwertung)

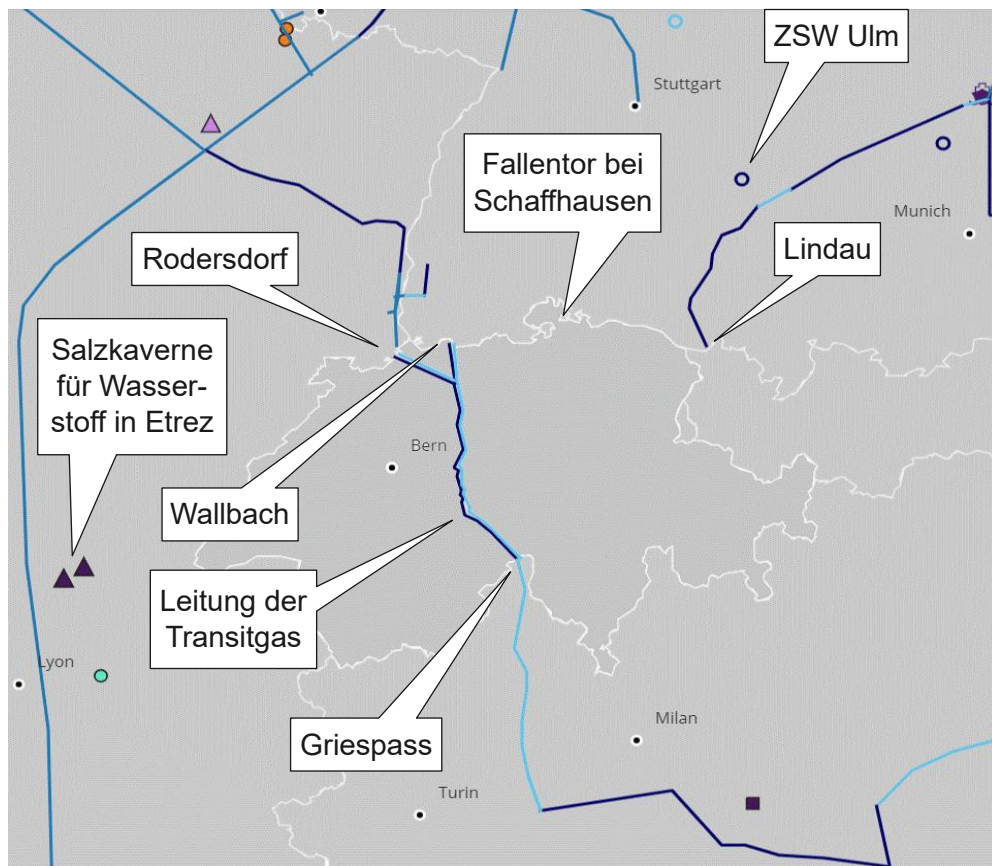


Abbildung 6: Aktuelle Planung der Wasserstoff Infrastruktur im Bodenseeraum. Ausschnitt aus Abbildung 3 Seite 16 ergänzt mit den Speichern bis 2050 und zusätzlichen Beschriftungen. Legende siehe Abbildung 3. [25]

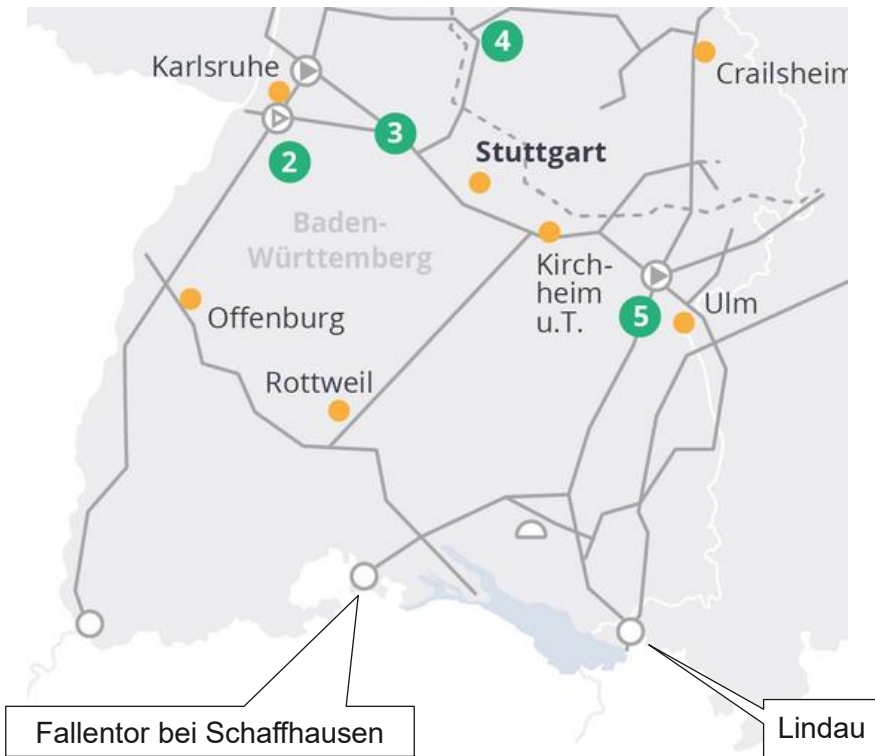


Abbildung 7: Südlicher Teil des Gastransportnetzes für Methan von Terranets BW [53]

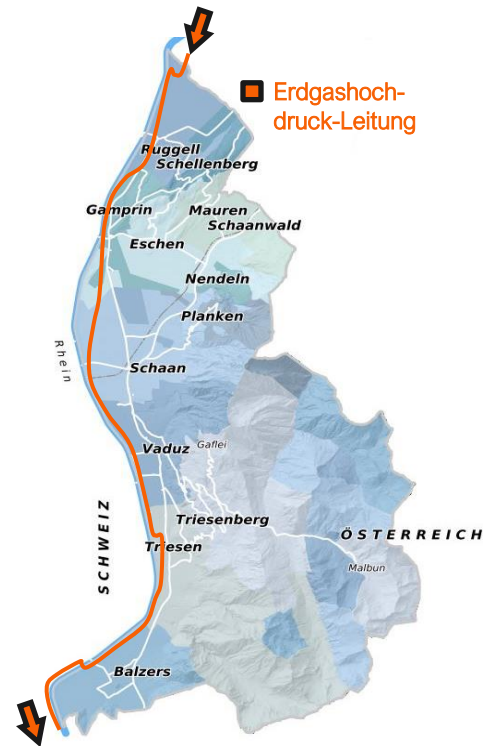


Abbildung 8: Erdgashochdruckleitung im Fürstentum Liechtenstein [34]

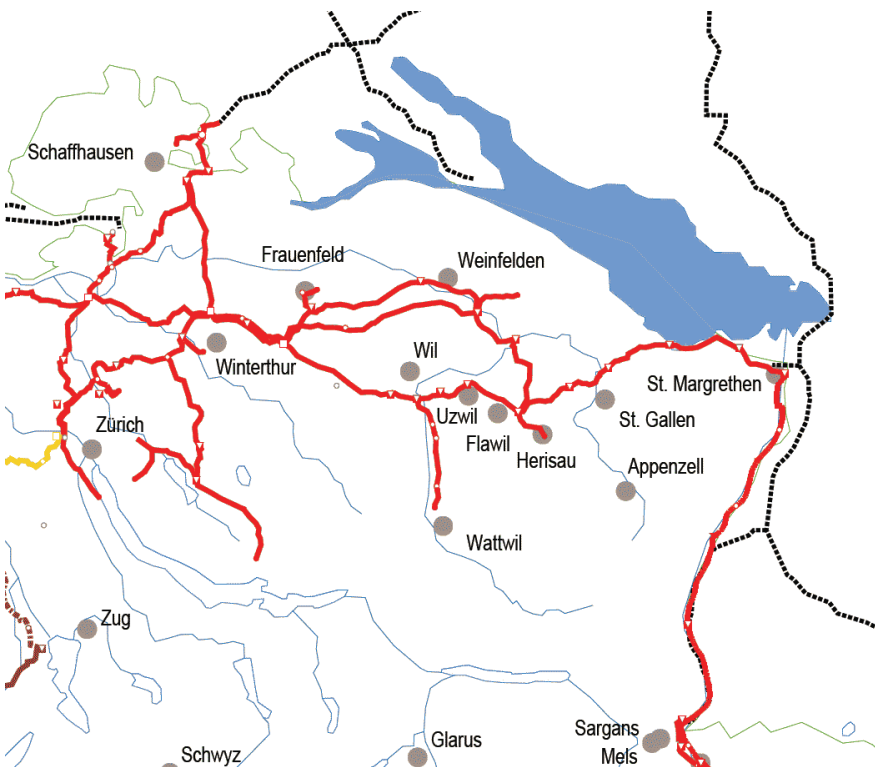


Abbildung 9: Gastransportnetz für Methan der Erdgas Ostschweiz AG (rot), Stand November 2021 [14].



Abbildung 10: Gastransportnetz der Vorarlberg Energienetze GmbH [58]

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die aufgezeigten Aktivitäten auf globaler, europäischer, nationaler und regionaler Ebenen zeigen, dass grüner Wasserstoff als wichtiger Energieträger und Rohstoff kein Hype mehr ist, sondern jetzt kommt, um zu bleiben. Technologien und Services rund um Wasserstoff sind Produkte, welche die Industrie der Bodenseeregion im In- und Ausland absetzen kann. Es ist keine Frage, ob und wann Wasserstoff eingeführt wird, sondern nur noch wie viel und für welche Anwendungen. Grüner Wasserstoff ist eine gute Ergänzung zum bereits existierenden erneuerbaren Energieträger Biogas. Zudem werden die aus grünem Wasserstoff hergestellten chemischen Energieträger Methan, Methanol und höhere Kohlenwasserstoffe eine Rolle spielen.

Die Produktion, Verteilung und Verwendung von grünem Wasserstoff ist ein System. Es kann nur in Zusammenarbeit von verschiedenen Akteuren eingeführt werden, genau wie das beim Aufbau des aktuellen Energiesystems auch der Fall war. Das System Wasserstoff kommt nicht von selbst, sondern es braucht für den Aufbau des Systems das aktive Vorgehen von einzelnen Akteurinnen und Akteuren, wobei im Bodenseeraum eine grenzüberschreitende Koordination von Vorteil ist. Zunächst sind lokale Initiativen wichtig, die noch ohne Wasserstoff-Netz funktionieren können. Gemäss den Plänen des "European Hydrogen Backbone" wird die Bodenseeregion bis 2030 von Norden her bis Lindau mit grünem Wasserstoff versorgt. Für die weitere Verteilung können bestehende Methanleitungen des bestehenden Gasnetzes umgenutzt werden oder parallel neue gebaut werden.

Aus dieser Kurzstudie gehen die folgenden Empfehlungen hervor:

- Es ist zum aktuellen Zeitpunkt wichtig, dass die Wirtschaft die Regularien zu Wasserstoff und die Wasserstoff-Infrastruktur aktiv mitgestaltet. Hier können die Handels- und Wirtschaftskammern eine koordinierende Rolle übernehmen.
- Die vorliegende Kurzstudie könnte in Zusammenarbeit mit Organisationen aus Deutschland, Österreich und dem Fürstentum Liechtenstein vervollständigt werden, sodass auch die Aktivitäten im deutschen und österreichischen Teil der Bodenseeregion gut abgedeckt werden.
- Die Handels- und Wirtschaftskammern können unter Einbezug einer Partei aus dem Fürstentum Liechtenstein unter ihren Mitgliedfirmen ein Netzwerk zum Thema Wasserstoff etablieren. Die vorliegende Studie ist ein erster Schritt dazu. Das Netzwerk kann informell existieren oder in eine ähnliche Form wie die trinationalen Organisationen [3H₂](#) bei Basel oder [GRH](#) in Luxemburg (Kapitel 3.5 Seite 15) gebracht werden. Das Netzwerk sollte unbedingt Kontakt und Kooperationen mit bereits existierenden Wasserstoff-Aktivitäten suchen, um das bestehende Know-how zu nutzen. Die Interessen können gepoolt werden (z.B. in Form einer Einkaufsgemeinschaft von Wasserstoff oder Wasserstofftechnologien), ohne Kartellregeln zu verletzen. Als Vorbild kann der Schweizerische [Förderverein Wasserstoffmobilität](#) dienen (siehe Seite 18).
- Es sollen Mitgliederfirmen der Wirtschafts- und Handelskammern miteinander vernetzt werden, die in Zukunft Wasserstoff als Rohstoff oder für Hochtemperatur-Prozesse verwenden wollen. Gemeinsam kann man sich an lokalen Projekten beteiligen, neue anstossen und sich langfristig für den Import und die Verteilung in einer Wasserstoff-Infrastruktur engagieren. Zudem kann man von anderen Projekten der Industrie, z.B. dem Projekt des [Tech](#)

Cluster Zug (Seite 19), lernen und eine neue Technologie wie die Pyrolyse als Pilotprojekt oder Leuchtturm umsetzen.

- Für die Mitgliederfirmen der Wirtschafts- und Handelskammern sollen Fördermöglichkeiten für innovative Projekte gefunden werden. Neben den nationalen und regionalen Fördermöglichkeiten gibt es nur wenig Möglichkeiten, Projekte über die Landesgrenzen hinaus zu fördern. Für internationale Projekte im Bodenseeraum sind dem Autor die folgenden Förderungen bekannt: Interreg Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein, Eureka Eurostars für KMUs, Wissenschaftsverbund Vierländerregion Bodensee (Nachfolgeorganisation der Internationalen Bodensee-Hochschule, IBH) für reine Forschungsprojekte.
- Eine Beteiligung an Infrastrukturprojekten ist denkbar: Für die Umnutzung eines Strangs des Hochdruck-Methanernetzes auf einer Seite des Rheins auf Wasserstoff sind Absichtserklärungen und Zusagen für die Abnahme von Wasserstoff hilfreich. Die ehemalige Ölleitung von Verderio in Italien über den Splügenpass nach Thusis könnte für die Zuführung von Wasserstoff in die Bodenseeregion vom Süden her über das Rheintal genutzt werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Arpagaus, C. "[Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht](#)", IES Institut für Energiesysteme, Neutechnikum Buchs (NTB, heute OST) an der 25. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte» in Burgdorf, 26. Juni 2019
- [2] Avenergy: "[Jahresbericht 2022](#)", 26. Mai 2023
- [3] Bittig, A. "Zuger Initiativen als Treiber der Dekarbonisierung", Präsentation am Kantonsrats Zmorge des [Vereins Elektromobilität Zug](#), 24. August 2023
- [4] Bodensee-Schiffsbetriebe GmbH (BSB) "[Elektroschiff MS Insel Mainau](#)", Zugriff: 1. Oktober 2023
- [5] Boulouchos, K., Neu, U., Baranzini, A., Kröcher, O., Markard, J., Mathys, N., Noailly, J., Roth, J., Scartezzini, J.-L., Schmitz, R., Schwarzenbach, R., Stauffacher, und M. Trutnevyte, E.: "[Schweizer Energiesystem 2050: Wege zu netto null CO₂ und Versorgungssicherheit](#)". Grundlagenbericht und Kurzfassung. Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Report 17 (3), August 2023
- [6] Deutsches Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) "[Die nationale Wasserstoffstrategie](#)", Juni 2020
- [7] Deutsches Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) "[Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar](#)", Zugriff: 29. September 2023
- [8] Deutsche Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (FNB Gas): "[Planungsstand Wasserstoff-Kernnetz](#)", Gelegenheit zur Stellungnahme für die Betreiber von Gasverteilernetzen, die Betreiber von Wasserstoffnetzen und die Betreiber von sonstigen Rohrleitungsinfrastrukturen gemäß § 28r Abs. 5 EnWG-Entwurf, 12. Juli 2023
- [9] Deutscher Nationaler Wasserstoffrat: "[Einordnung verschiedener Pfade der Herstellung von Wasserstoff \(„Farbenlehre“\)](#)", 1. April 2022
- [10] Dornburg, A. und Wiegand C.: "[Hy Allgäu wirtschaftliche und regionale Gewinnung von grünem Wasserstoff](#)", Machbarkeitsstudie – HyExperts, September 2021
- [11] Drexel, Christof (2021): "[Wasserstoff in der Vorarlberger Industrie. Heutige und zukünftige Anwendungsgebiete](#)". Kurzstudie. Wirtschaftskammer Vorarlberg.
- [12] Enapter: "[Die Zukunft mit Wasserstoff](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [13] Entsog: "[Hydrogen Project Visualisation Platform](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [14] Erdgas Ostschweiz (EGO): "[Erdgas-Transportnetz EGO Stand November 2021](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [15] Europäische Kommission: "[A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe](#)", Communication COM (2020) 301 final. Brüssel: Europäische Kommission, Juli 2020
- [16] Europäische Kommission: "[Hydrogen Valleys S3 Partnership](#)", Zugriff 1. Oktober 2023
- [17] European Clean Hydrogen Alliance: "[Roadmap on Hydrogen Standardisation](#)", März 2023

- [18] European Council: "[Infographic - How is EU electricity produced and sold?](#)", Zugriff 28. September 2023
- [19] EHP: "[European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries](#)", April 2022
- [20] EMCEL Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität "[Wann lohnt sich der Transport von Wasserstoff per Wasserstoffpipeline](#)", 16. Juli 2019, Zugriff 28. September 2023
- [21] Friedl, M, Antonini, C., Frank, E., Gerstein, D., Heneka, M., Isik, V., Köppel, W., Kunz, B., Rasmusson, H., Thalmann, F., Weide, T. und Zauner, A. "[Renewable Long-Haul Road Transport Considering Technology Improvements and European Infrastructures](#)", European Research Institute for Gas and Energy Innovations ERIG, Juli 2023
- [22] Frommelt, O. C.: "[Wassersstoff \(H2\): der Antrieb der Zukunft](#)", Unternehmer, das Liechtensteiner Wirtschaftsmagazin, März 2021, Seiten 4 bis 5.
- [23] Getec: "[Getec unterzeichnet Kooperationsabkommen für die Nutzung von sauberem Wasserstoff aus den Vereinigten Arabischen Emiraten](#)", 21. März 2022
- [24] GreenH2: "[IWB und Fritz Meyer AG planen Anlage für grünen Wasserstoff im Hafen Birsfelden](#)", Mai 2023
- [25] H2Inframap: Webseite www.h2inframap.eu, Zugriff 27. September 2023
- [26] H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG: "[H2 tanken](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [27] Hydrogen Europe: "[Joint declaration signed on hydrogen valleys 1st March 2023](#)", Zugriff 1. Oktober 2023
- [28] Hydrogen Supply Chain: "[The Suido Frontier](#)", Zugriff 29. September 2023
- [29] Hydrospider: "[Tankstellen](#)", Zugriff 8. September 2023
- [30] International Energy Agency (IEA) "[Global energy investment in clean energy and in fossil fuels, 2015-2023](#)", Mai 2023
- [31] Kälin, D: "Markt und Regulierung von E- und Biofuels in der Schweiz", Bachelorvorarbeit OST, Dezember 2022.
- [32] Kunz, B. und Friedl, M. "[Hydrogène et trafic routier en Suisse](#)", Aqua & Gas No 5, Mai 2023
- [33] Landesverwaltung Fürstentum Liechtenstein: "[Energie 2021](#)", 2022
- [34] Liechtenstein Wärme, zur Verfügung gestellt am 4. Oktober 2023
- [35] Mehr, W. E., Lemberg, S. und Federl, K. "[HyAllgäu](#)", Wissenschaftliche Begleitung des Projekts durch die Hochschule Kempten, 26 Juli 2021
- [36] NEL ASA: "[About Us](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [37] Österreichische Bundesministerien Nachhaltigkeit und Tourismus sowie Verkehr, Innovation und Technologie "[#Mission2030, Die österreichische Klima- und Energiestrategie](#)", Mai 2018

- [38] Österreichisches Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: "[Energie in Österreich, Zahlen, Daten, Fakten](#)", 2022
- [39] Österreichisches Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: "[Wasserstoffstrategie für Österreich](#)", Juni 2022
- [40] Preißinger, M.: "[Wasserstoff. Potenziale, Chancen und Herausforderungen für den Einsatz in zukünftigen Energiesystemen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenbedingungen in Vorarlberg](#)", Fachhochschule Vorarlberg, Forschungszentrum Energie, 6. Oktober 2021.
- [41] RAG Austria AG "[H2EU+Store](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [42] RAG Austria AG "[Klimatechnologie "Methan-Elektrolyse": Österreichs erste Demoanlage zur Nutzung von Erdgas ohne CO2-Emissionen für die Produktion von Wasserstoff und festem Kohlenstoff geht in Kremsmünster in Betrieb](#)", Pressemitteilung, 28. September 2023
- [43] Regierung des Fürstentum Liechtenstein: "[Energierstrategie 2030, Energievision 2050](#)", Oktober 2020
- [44] Rittmann-Frank, M. und Calfisch, M. "[Evaluation solarer Prozesswärmeanlagen in der Schweiz](#)", Schlussbericht, SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil (HSR, heute OST), 2017
- [45] Rolls-Royce Power Systems AG MTU: "[Wasserstoff-Elektrolyse im ganz grossen Stil](#)", 28. Juni 2022
- [46] Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) "[Schweizer Energiesystem 2050: Wege zu netto null CO₂ und Versorgungssicherheit](#)", 18. August 2023
- [47] Schweizerisches Bundesamt für Energie (BFE): "[Gesamtenergiestatistik 2021](#)", 2022
- [48] Schweizerisches Bundesamt für Energie (BFE): "[Energieperspektiven 2050+ \(EP 2050+\)](#)", 2020 bis 2022
- [49] Schweizerisches Bundesamt für Energie (BFE): "[Thesen zur zukünftigen Bedeutung von Wasserstoff in der Schweizer Energieversorgung](#)", 27. September 2022
- [50] Schweizerischer Verband des Gas und Wasserfaches (SVGW): "[H1000 d Empfehlung zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff](#)", April 2023
- [51] "[SouthH2 Corridor](#)", Zugriff 4. Oktober 2023
- [52] Statista: "[Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträger im Jahr 2021](#)", Zugriff 6. September 2023
- [53] Terranets BW "[Wir transportieren Ihr Gas](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [54] Topsoe: "[Green Hydrogen](#)", Zugriff 1. Oktober 2023
- [55] Toyota Europe: "[The Hydrogen Economy](#)", Zugriff 29. September 2023

- [56] Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG: "[Nur mit Wasserstoff lassen sich die Klimaziele erreichen](#)", Januar 2023
- [57] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE: "[Energiezukunft 2050](#), Energieversorgung der Schweiz bis 2050, Zusammenfassung von Ergebnissen und Grundlagen", 13. Dezember 2022
- [58] Vorarlberger Energienetze GmbH "[Erdgas-Mobilität](#)", Zugriff 3. Oktober 2023
- [59] Wider, S., Herr, M. und Schürstedt, P. "[Regenerativ erzeugter Wasserstoff aus Biomasse und Solarenergie und dessen Verteilung](#)", Projekt – Studie von HyEnTec beauftrag durch Energieagentur Kreis Konstanz, Dezember 2016
- [60] Worm, H., Mollet, J., Kuhlmeier, F., Heuser, Ph.-M., Lovy, L., Gelfort, A. und Züttel, A.: "[Rahmenbedingungen für Wasserstoff in der Schweiz](#)", Schlussbericht Phase 1 des Studienprojekts. VSE und VSG, 14. September 2023
- [61] Zerta, M., Lust, F., Landinger, H., Beneke, N., Butsch, H., Pick, S., Rottmann, F., Siegler, D., Böing, H., Middelhoff, E. und Claussen, J.: "[HyAllgäu*-Bodensee, Auf dem Weg zur Wasserstoffregion](#)", Abschlussbericht März 2023
- [62] Zürichsee Schifffahrtsgesellschaft (ZSG): "[Die neuen eLimmatboote fahren klimaneutral](#)", Zugriff 1. Oktober 2023

Anhang: Netzwerke

(Kein Anspruch auf Vollständigkeit)

[Arbeitsgemeinschaft der Alpenländer \(ArgeAlp\)](#), Hat sich unter St.Galler Vorsitz im Sommer 2023 mit den Themen Grüner Wasserstoff und Energieversorgung im Alpenraum beschäftigt.

Erfahrungsgruppen für Power-to-X und Methanol des [IET Institut für Energietechnik](#), die sich informell austauschen.

[European Hydrogen Backbone](#), Initiative von 32 Energieversorgern

[Forschungszentrum Energie](#), Fachhochschule Vorarlberg (FHV – Vorarlberg University of Applied Sciences), Dornbirn.

[Green H2 Projekt](#), Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt Dornbirn mit Wasserstoff Trainings- und Demonstrationsanlage präsentiert am 24. März 2023

[H2 Connect Eco](#): Ehrenamtlicher Verein in Lindau

[Plattform H2BW](#): betrieben durch die Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg "[e-mobil BW](#)" bündelt die Wasserstoffaktivitäten in Baden-Württemberg, fördert den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg und führt eine landesweite H2-Bedarfsabfrage durch.

[Interessengemeinschaft Power-to-X \(IG-PtX\)](#), gegründet im Jahr 2021 von Energieversorgungsunternehmen aus der Ostschweiz und dem Fürstentum Liechtenstein sowie von Markus Friedl.

[Swiss Power-to-X Collaborative Innovation Network \(SPIN\)](#), gegründet 2021, Verein von Industrie (Co-Präsident Patrick Meili, Managing Director bei MAN Energy Solutions Schweiz AG), Politik (Co-Präsident Martin Bäuml, Nationalrat Grünliberale) und Wissenschaft (Co-Präsident Markus Friedl, OST)

[Swissmem](#), Verband der Schweizer Tech-Industrie (Maschinen-, Elektro- und Metall-Industrie sowie verwandte Technologiebranchen), Industriesektor "[New Energy Systems](#)" (NES), gegründet im April 2021. Markus Friedl hat den Industriesektor mitgegründet und ist im Vorstand.

[Trinationale Wasserstoff Initiative 3H₂](#) im Raum Basel.

[Verein der H₂ Produzenten](#) Schweiz. Das IET Institut für Energietechnik ist Mitglied.

[Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg](#), Institut, das Forschung auch im Bereich von Wasserstoff betreibt.

Impressum

Datum

1. Oktober 2023

Verfasst von

Prof. Dr. M. Friedl

OST – Ostschweizer Fachhochschule
IET Institut für Energietechnik

Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil, Switzerland

iet@ost.ch, www.ost.ch/iet