



Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Multidisziplinäre Ansätze für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft

Andreas Zauner, Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

25.04.2024, 6. Branchentag Wasserstoff, Vösendorf

Wer wir sind...

- **Außeruniversitäres Forschungsinstitut**, gegründet 2001
- **Partner of Innovation** der Johannes Kepler Universität Linz
- gemeinnütziger Verein – **nicht gewinnorientiert**
- 41 Mitarbeiter:innen; 100 F&E-Projekte p.a.; **aktuell 80 laufende Projekte** (10 HORIZON-EU-Projekte)
- Abteilungen: Energiewirtschaft, Energierecht, Energietechnik (Technologie-Assessment)
- **Vision:** Aktive Entwicklung eines CO₂-neutralen Energiesystems, das Lebens-, Wirtschafts- und Umweltraum positiv beeinflusst und hierbei die europäischen Volkswirtschaften stärkt.
- Das Energieinstitut an der JKU Linz ist professioneller Projektpartner, wo **multi- und transdisziplinäres Wissen** im Segment Energieforschung gefragt ist.



Forschungspotentiale zu erneuerbarem Wasserstoff

- Wasserstoff- und Power-to-X-Forschung am Energieinstitut **seit 2007**
- Seit 2008 wurden/werden an **84 extern finanzierten Forschungsprojekten im Kontext Wasserstoff** (international und national) am Energieinstitut geforscht (u.a. in 6 HORIZON-Projekten)
- Autor der offiziellen österr. **FTI-Roadmap Power-to-Gas**
- Konzeptionierung und wiss. Partner der österr. **Vorzeige-Region WIVA P&G** (H₂ und Power-to-Gas)
- Mitglied des **Strategie-Boards des OÖ. Wasserstoff-Netzwerks**
- Mitglied des **Advisory Boards der Servicestelle Erneuerbare Gase**
- Vertretung der österr. Forschung bei diversen H₂- und CO₂-Tasks der **Internationalen Energieagentur**

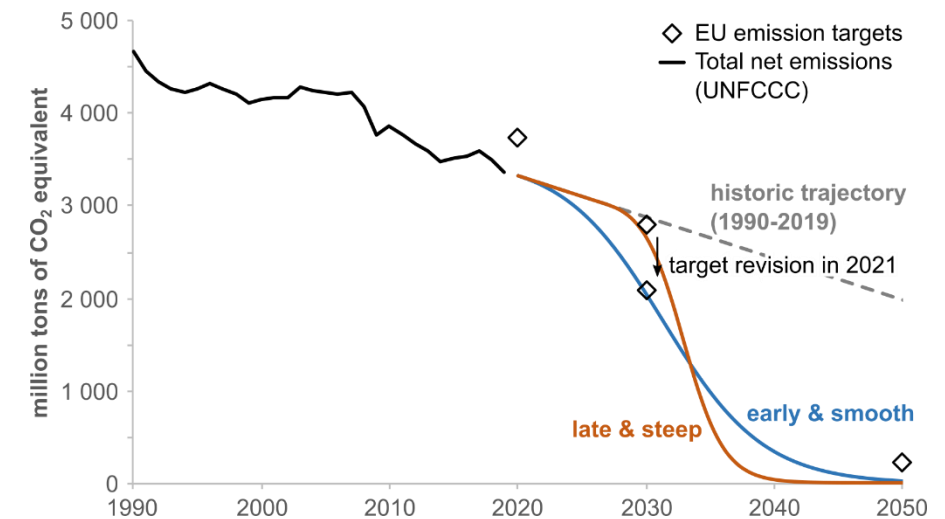


Entscheidungsfindung und Umsetzung

Die Rolle der Technologiefolgenabschätzung

- Die Erreichung der internationalen **Klimaziele** erfordert eine **Transformation des Energiesystems** über alle Sektoren hinweg.
- Die **Zeiträume**, die für die gesetzten Klimaziele vorgegeben sind, **lassen es jedoch kaum zu**, dass sich potenzielle **Technologien** in ihren jeweiligen Anwendungsfeldern etablieren.
 - Es ist zwingend erforderlich, die „**Eignung**“ dieser Technologien in einem **frühen Entwicklungsstadium festzustellen**, insbesondere im Hinblick auf
 - technischen Machbarkeit und
 - der langfristigen Wirtschaftlichkeit.

Potential pathways of early vs. late transformation



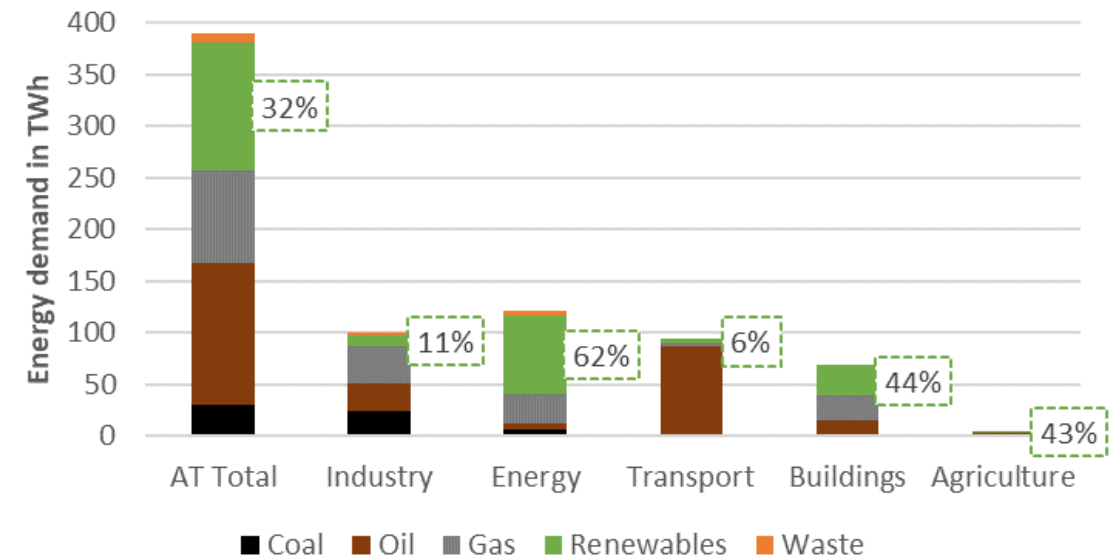
Source: own representation based on Victoria, et al. (2020), „Early decarbonization of the European energy system pays off“, doi: 10.1038/s41467-020-20015-4

Energiebedarf heute

Status quo in Österreich

- Es gibt immer noch eine **große Menge fossiler Brennstoffe**, die ersetzt werden müssen, um bis 2040 in Österreich klimaneutral zu werden.
- **Erneuerbarer Wasserstoff** und seine Derivate haben das theoretische Potenzial, **fossile Brennstoffe in (fast) allen Bereichen zu ersetzen**, ...
- ... aber es ist unwahrscheinlich, dass dies in allen Bereichen innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens zur Erreichung der Klimaziele geschieht.

Demand on energy carriers related to sectors in Austria



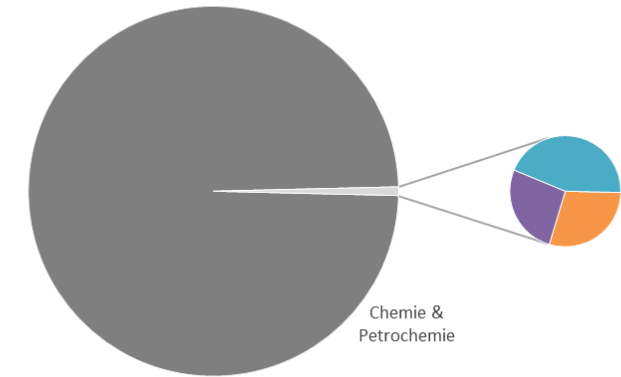
Source: own representation based Statistik Austria, "Energiebilanzen der Bundesländer ab 1988"

Wasserstoffbedarf heute

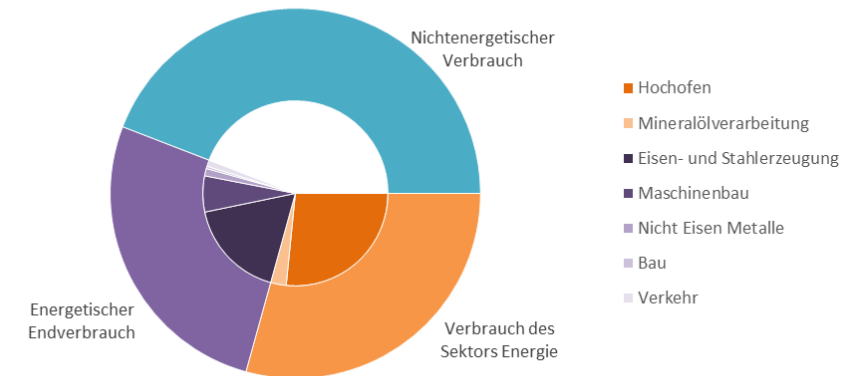
Global / Österreich / Anwendungsgebiete

- Weltweit wurden 2022 etwa 95 Mio. Tonnen (3.200 TWh) Wasserstoff produziert.
 - Wasserstoff wird heute fast ausschließlich in Raffinerien, in der chemischen Industrie (Ammoniak, Methanol) und in für die Stahlerzeugung verwendet.
- In Österreich werden jährlich ca. 140.000 Tonnen (4,6 TWh) Wasserstoff verbraucht.
 - Auch hier vor allem in der chemischen und petro-chemischen Industrie.
 - Aber auch in anderen Industriesektoren (Stahlerzeugung, Halbleiterproduktion) und z.T. im Verkehr (dzt. 67 Kfz).

gesamter Wasserstoffbedarf in Österreich



direkter Wasserstoffverbrauch nach Sektor

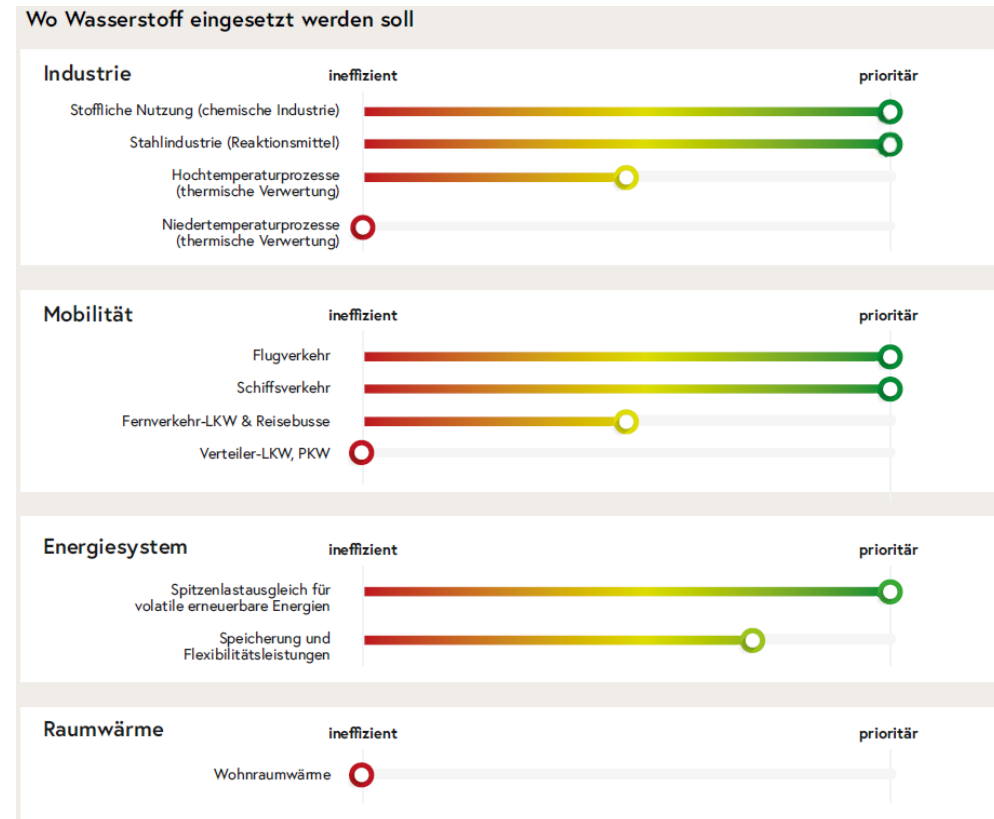


Quellen:
IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, <https://doi.org/10.1787/cb2635f6-en>
eigene Darstellung nach Statistik Austria, Wasserstoffbilanz 2019-2022

Einsatzgebiete für „Grünen“ Wasserstoff

Notwendige/Prioritäre Einsatzgebiete zur Erreichung der Klimaneutralität (in Österreich)

- **Industrielle Prozesse**
 - Primärstahlerzeugung
 - Chemische Industrie (Düngemittel, Kunststoffe, ...)
 - Hochtemperaturprozesse (z.B. Kalkbrennen, Glasherstellung, ...)
 - Halbleiter-Herstellung
- **Nicht-elektrifizierbarer Verkehr**
 - Flug- und Schiffsverkehr
 - Fern- und Schwerverkehr
- **Energiebereitstellung (Versorgungssicherheit)**
 - Abdeckung von Spitzenlasten (Strom und Wärme)
 - Saisonale Speicherung von Überschüssen (Wind, PV)



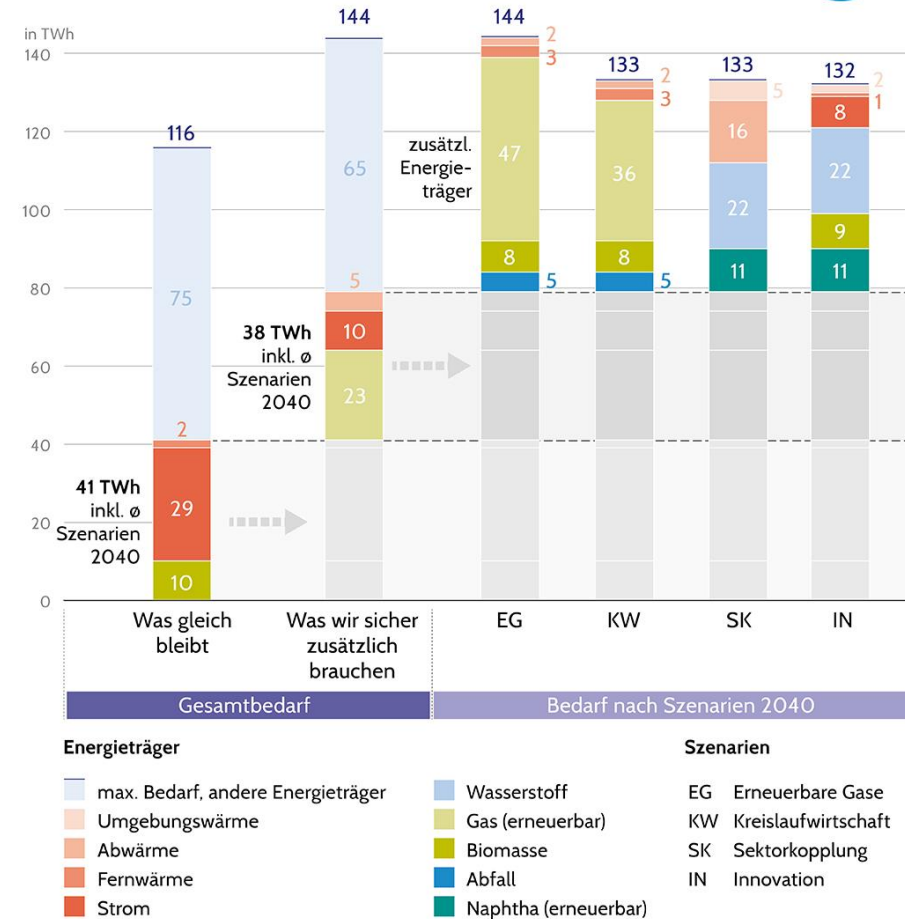
Quelle: BMK (2022), „Wasserstoffstrategie für Österreich“

Wasserstoff in der Industrie

Transformationspfade der Industrie

- Egal mit welchen Technologien die **Industrie klimaneutral** wird, sie wird jedenfalls auf **erneuerbare Gase** angewiesen sein
- Der Transformationspfad verändert nur ...
 - ... die **Art** des Bedarfs (Wasserstoff vs. Methan)
 - ... die **Höhe** des Bedarfs → Effizienz
- Davon hängt aber auch ab ...
 - ... wie hoch der **Strombedarf** für die Wasserstoffproduktion ist
 - ... wie hoch der **Bedarf für Importe** ist
- **Importe werden auf jeden Fall notwendig sein!**

Energiebedarf der Industrie im Vergleich



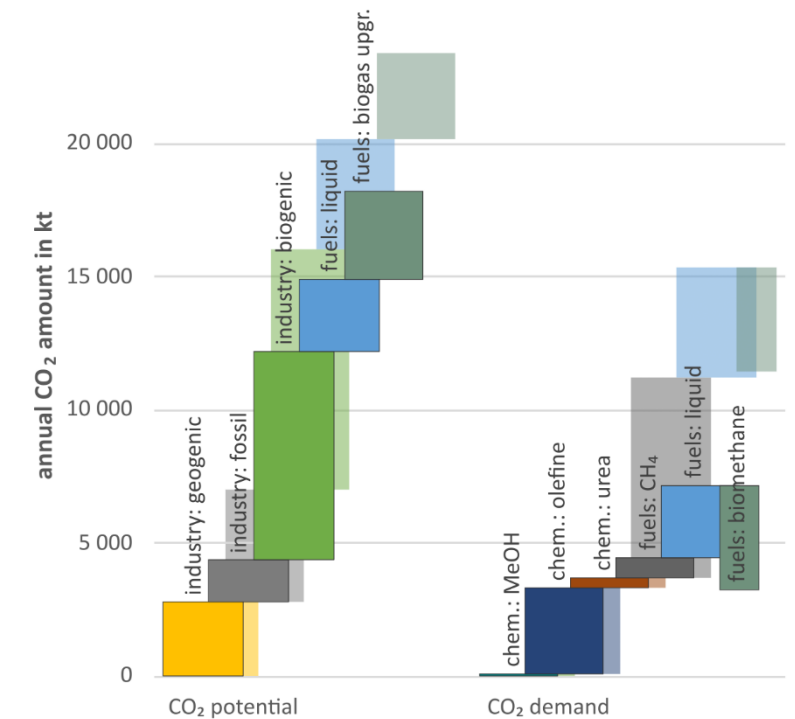
Auftraggeber: Klima- und Energiefonds
Quelle: Studie „transform.industry – Transformationspfade für eine klimaneutrale Industrie 2040 in Österreich“

APA-GRAPHIK ON DEMAND

Wasserstoff in der Industrie

Exkurs „Carbon Capture & Utilization

- Auch im klimaneutralen Energiesystem wird **zukünftig CO₂** anfallen, vor allem aus ...
 - ... Industrie- und Energiesektor
 - ... klimaneutralen Brennstoffen
- Parallel dazu besteht auch weiterhin ein **Bedarf an Kohlenstoff** in Produkten für ...
 - ... chemische Grundstoffe
 - ... klimaneutrale Brenn- & Rohstoffe

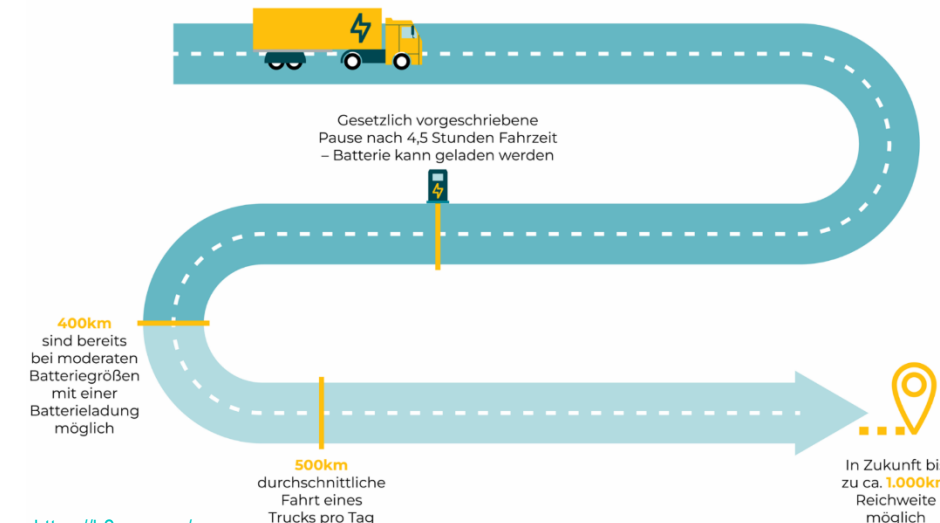


Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz

Wasserstoff in der Mobilität

Chancen und Möglichkeiten für H₂ als Treibstoff

- **Status Quo** in Österreich
 - Rund 70 PKW zugelassen, 5 öffentliche Tankstellen
 - Testbetriebe im öffentlichen Verkehr
- **Zukünftiger Einsatz**
 - Herstellung von **Flugkraftstoffen**
 - direkter Einsatz von H₂ mittelfristig nicht absehbar – zu geringe Energiedichte gegenüber flüssigen Kraftstoffen
 - zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (e-Fuels) – neben biogenen Alternativen
 - Im **Schwer- und Überlandverkehr** bzw. im öffentlichen Verkehr
 - Vorteile bzgl. Reichweite und Ladezeiten
 - ABER zunehmende Konkurrenz durch batterieelektrische Antriebe (Reichweite vs. Ruhezeiten)

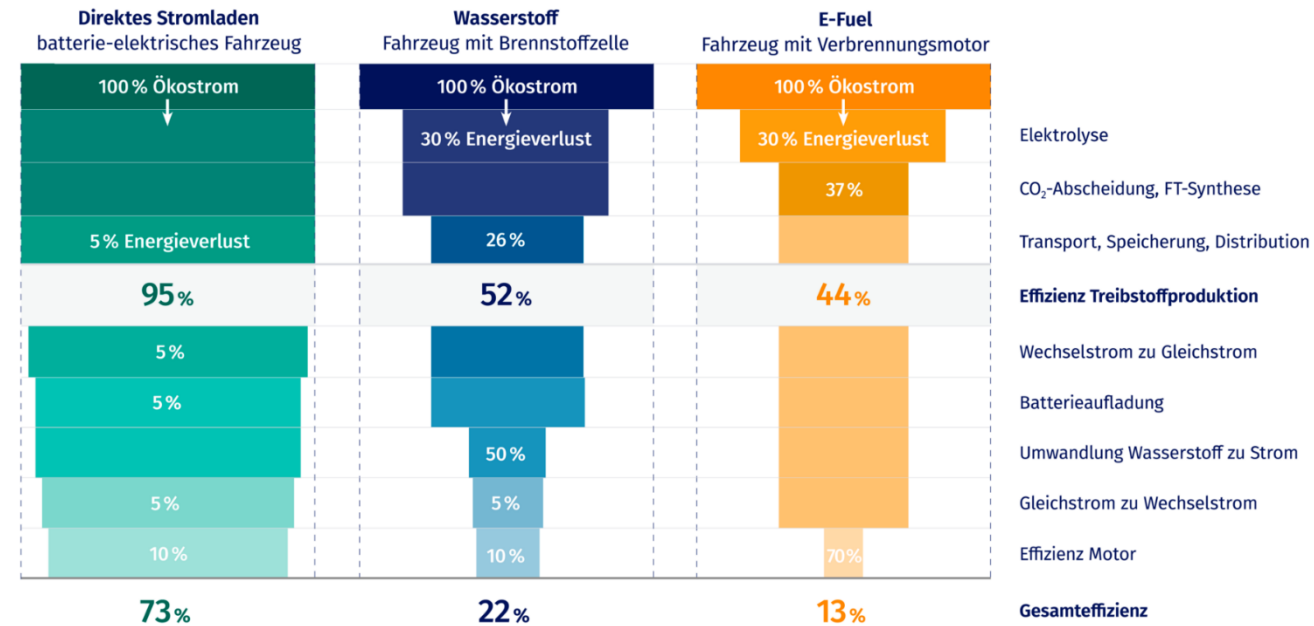


Quellen: <https://h2-map.eu/>
<https://traton.com/de/newsroom/aktuelle-themen/zehn-batterie-mythen-im-fakten-check.html>

Wasserstoff in der Mobilität

Individualverkehr

- Nur etwa **5 % aller Autofahrten** in Österreich sind **länger als 50 km**
- Im Schnitt legt ein Auto-Haushalt **45 km pro Tag** zurück
- Batterie-elektrische Fahrzeuge haben **nur selten ein Reichweitenproblem**
- Mit Blick auf den **Primärenergieverbrauch** ist Elektromobilität die effizienteste Antriebsform
- **Kosten** für Wasserstoff (und e-Fuels) werden **deutlich über denen von E-Mobilität** liegen



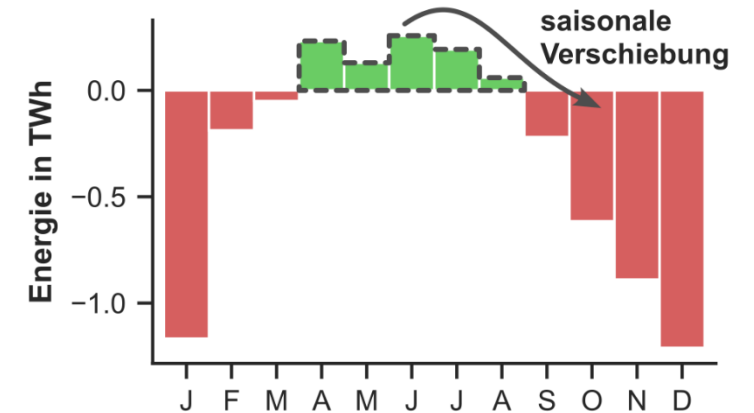
Quelle: Wien Energie bzw. VCÖ, <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/wirkungsgrad-elektroauto-vs-verbrenner-efuels/>

Wasserstoff im Energiesektor

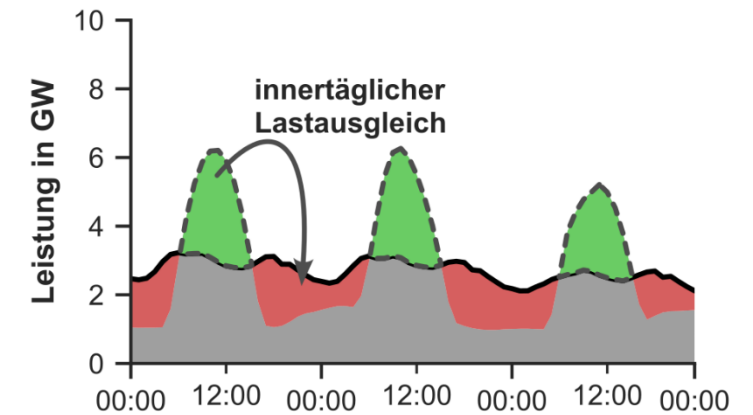
Saisonale Speicherung

- Es wird vor allem im Sommer zu **Überschüssen** aus Photovoltaik kommen, die **in Wasserstoff umgewandelt** werden können.
- Wasserstoff kann **langfristig** (saisonal) **gespeichert** werden
 - Verschiebung von Energie vom Sommer in den Winter
 - Abdeckung von Spitzenlasten (Strom und Wärme)
- Ein wesentlicher Anteil (20–25%) kann aber auch „**intraday**“ **kompensiert** werden → **Kurzzeitspeicher**.
- **Voraussetzung** für die Nutzung dieser Residuallasten sind darüber hinaus entsprechende **Speicher- und Netzkapazitäten** (Spitzenleistungen von > 30 GW)

Wasserstoffspeicher



vs.
Batteriespeicher

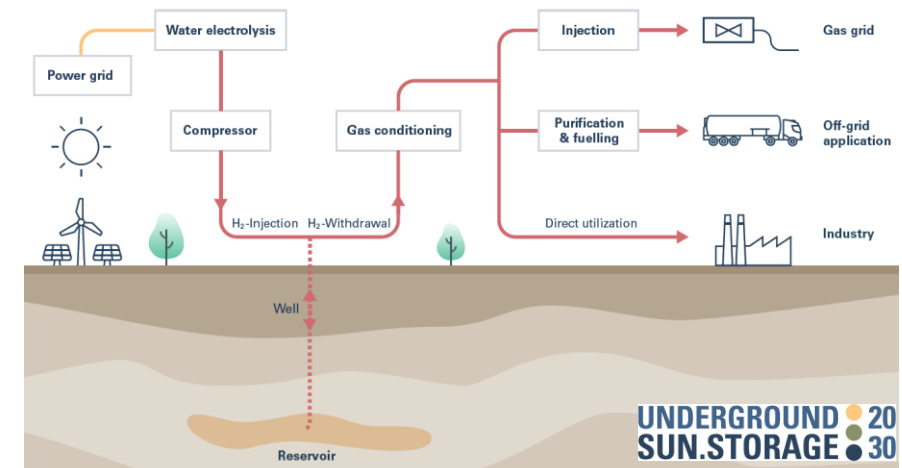


Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz

Saisonale Wasserstoffspeicher

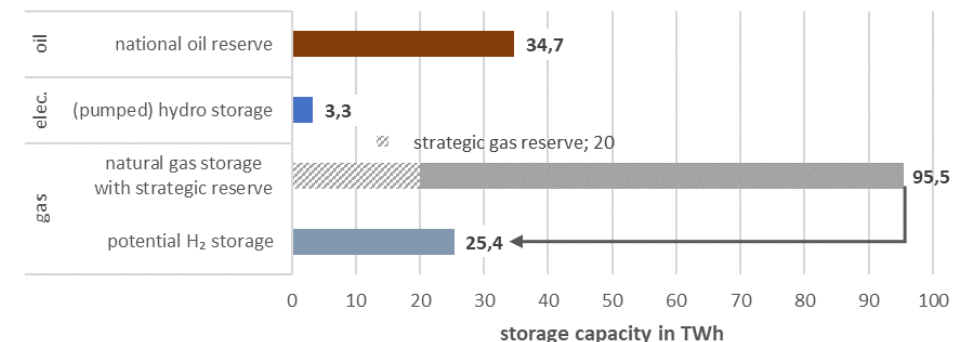
Speicherpotenziale

- **Ausgeförderte Gas- & Öllagerstätten** können potenziell für H₂-Speicherung genutzt werden.
 - Weltweit erster 100% H₂-Speicher in einer ehemaligen Lagerstätte seit April 2023 in OÖ (Gampern) in Betrieb (www.uss-2030.at).
- **Erdgas-Speicherkapazitäten** sind in Österreich insgesamt rund 95 TWh.
- Die geringere volumetrische Energiedichte **reduziert die Energiespeicherkapazität** bestehender Standorte.
 - Für eine gleichbleibende Versorgungssicherheit werden Kapazitäten entsprechend erweitert werden müssen.



Source: Underground Sun Storage 2030, www.uss-2030.at

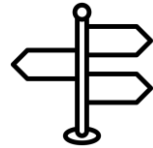
Austrian energy storage capacities



Source: Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Saisonale Wasserstoffspeicher

Hindernisse und Chancen für die großvolumige Speicherung von Wasserstoff in unterirdischen porösen Gaslagerstätten



Opportunities



Nachhaltige Entwicklung und Schaffung von **neuen, zusätzlichen Arbeitsplätzen**



Unterstützung des Ausbaus und Integration volatiler **erneuerbarer Energieerzeugung**



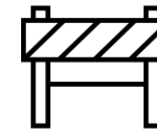
Entwicklung neuer **Geschäftsmodelle**



Erhöhung der **Versorgungssicherheit** und der **Energieautarkie**



Schaffung **innovativer, nachhaltiger Energienetze**



Barriers



Begrenzte Erfahrung, Mangel an großskaliger Infrastruktur



Nutzungskonflikte



Geringe öffentliche Wahrnehmung und **soziale Akzeptanz**



Mangel an zuverlässigen Analysen zu **potenziellen Standorten** (mit hohen Kosten verbunden)



Unbekannte **Speicherverluste** aufgrund von u.a. der Gesteinseigenschaften



Fehlen allgemeiner (Ausführungs-) **Standards**

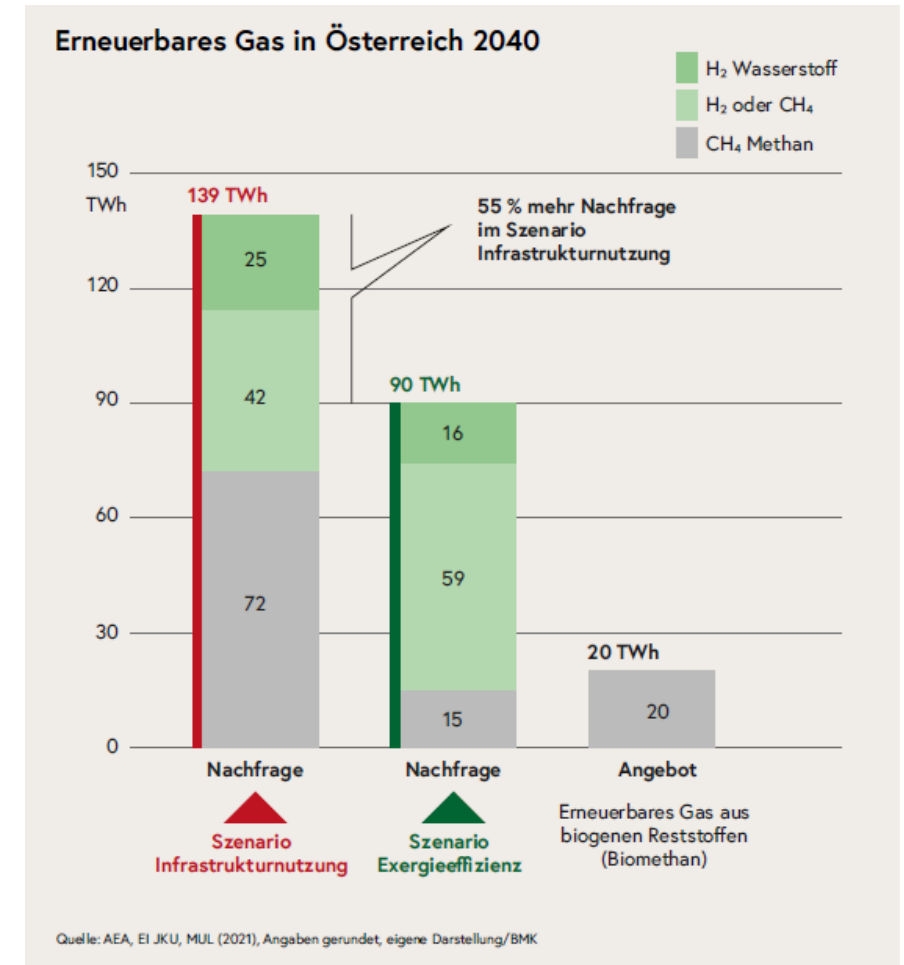
Source: Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz, Projekt USS2030

Wasserstoff als Teil des zukünftigen Energiesystems

Zukünftiger Gesamtbedarf Österreich

- Für die österreichische Klimaneutralität 2040 resultiert ein **Gesamtbedarf** an erneuerbaren Gasen (H₂ und CH₄) von **ca. 90 bis 140 TWh**
 - nur für Industrie und (Schwer-)Verkehr
 - abhängig vom Technologiepfad
- Demgegenüber steht ein **Angebot** von
 - bis zu 20 TWh an **Biomethan** aus biogenen Reststoffen
 - bis zu 15 TWh aus **saisonalen Stromüberschüssen** (abzüglich Bedarf im Energiesektor)

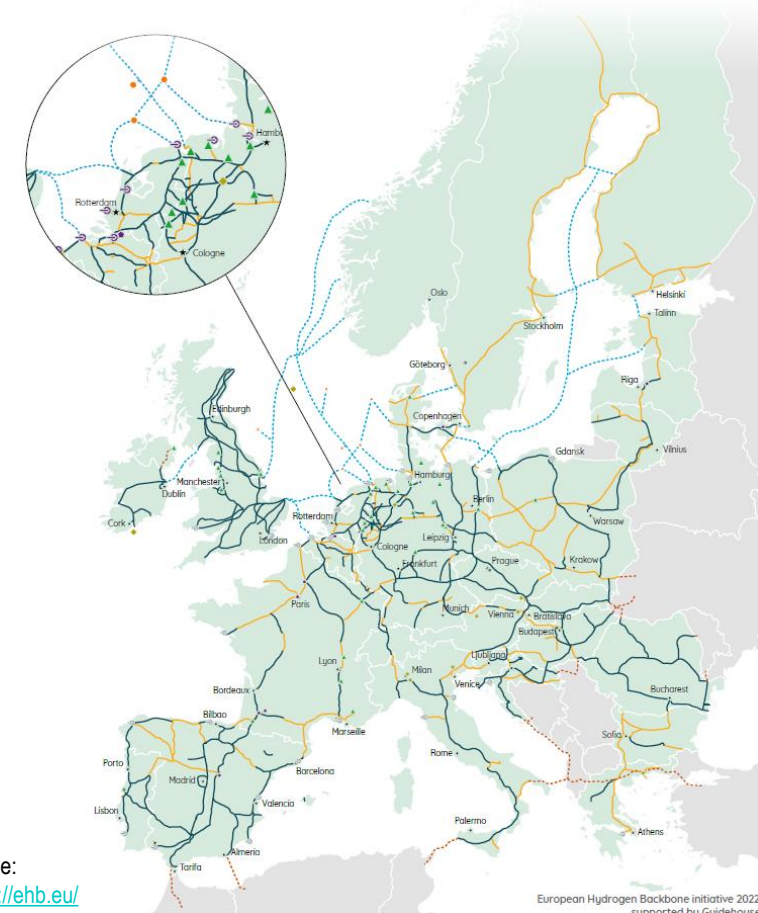
- **Importe werden auch zukünftig notwendig sein!**
- **Importländer und Routen sind bereits heute zu planen!**



Wasserstoff als Teil des zukünftigen Energiesystems

Import von Wasserstoff

- Gründe für den Import von Wasserstoff:
 - Inländisches Produktionspotenzial ist zu gering
 - Kann in anderen Ländern (aufgrund günstigerer Bedingungen, wie höheres Solar-/Windpotenzial) kostengünstiger produziert werden
- Für die Lieferung von Wasserstoff innerhalb Europas und aus den Nachbarländern ist der Transport über Pipelines die günstigste Option
 - vor allem, wenn die bestehende Infrastruktur genutzt werden kann,
 - aber auch für neue Pipelines bis zu einigen 1.000 km.
- Der **Hydrogen Backbone** ist als europäisches **Fernleitungs- und Übertragungsnetz** für Wasserstoff geplant.
 - Beinhaltet **neue Pipelines** und **Umrüstung** bestehender Erdgasleitungen
- Zusätzlich sind **nationale Netzanpassungen** notwendig und in Planung – siehe ÖNIP



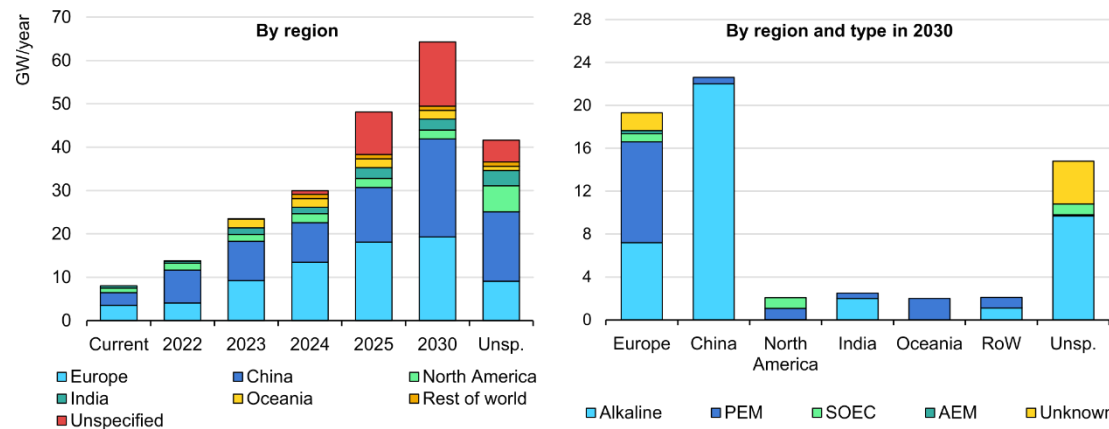
Quelle:
<https://ehb.eu/>

Wasserstoff als Teil des zukünftigen Energiesystems

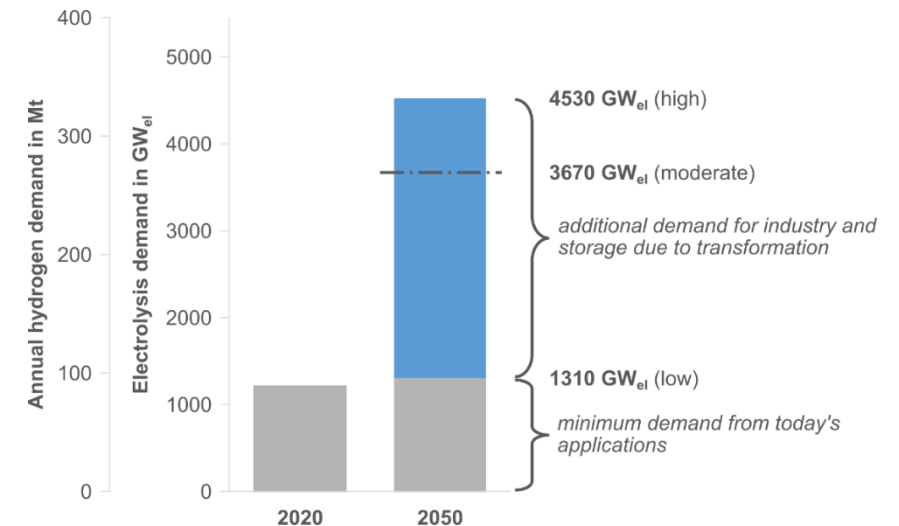
Globaler Bedarf an Elektrolyseuren

- Der künftige Bedarf der Industrie und der Speicherung wird **mindestens das Dreifache des heutigen H₂-Bedarfs betragen**.
- Die steigende Nachfrage nach Wasserstoff muss zu einer **erheblichen Ausweitung der Produktionskapazitäten von Elektrolyseuren** führen.

Elektrolyser production capacity by region and type



Demand development for hydrogen and PtG capacities until 2050



Source: own representation based on Böhm, et al. (2020): "Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects", doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114780

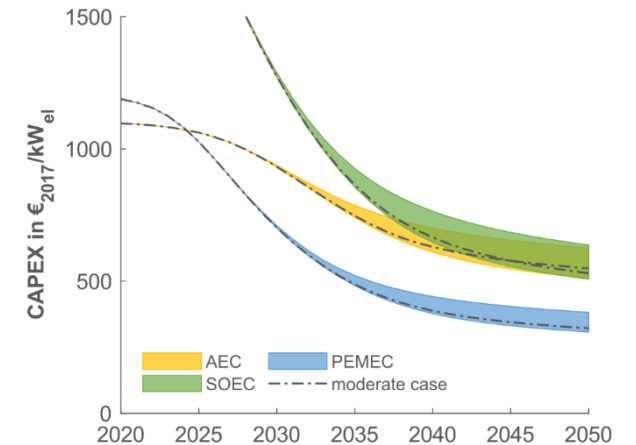
Source: adapted from IEA (2022), "Global Hydrogen Review 2022", doi: [10.1787/a15b8442-en](https://doi.org/10.1787/a15b8442-en)

Wasserstoff

Techno-ökonomische Aspekte

- Für alle Elektrolysetechnologien sind aufgrund des weltweiten Ausbaubedarfs **signifikante Lerneffekte zu erwarten**.
- **Potentielle Kostenreduktion von >75%** bis 2050 für Multi-MW-Systeme (>50 MW) durch technologisches Lernen und Upscaling von Einzelanlagen.
 - Abhängigkeit der Gestehungskosten von den jährlichen Volllaststunden nimmt ab.
- PtG-Anlagen benötigen **für langfristige Wirtschaftlichkeit**
 - hohe Anlagenkapazitäten (> 50 MW_{el})
 - günstige erneuerbare Stromerzeugung
 - hocheffiziente Technologien und Systeme
 - Nutzung von Synergieeffekten (Abwärme & O₂)

Learning curves determined for electrolysis technologies



Source: from Böhm, et al. (2020): "Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects", doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114780

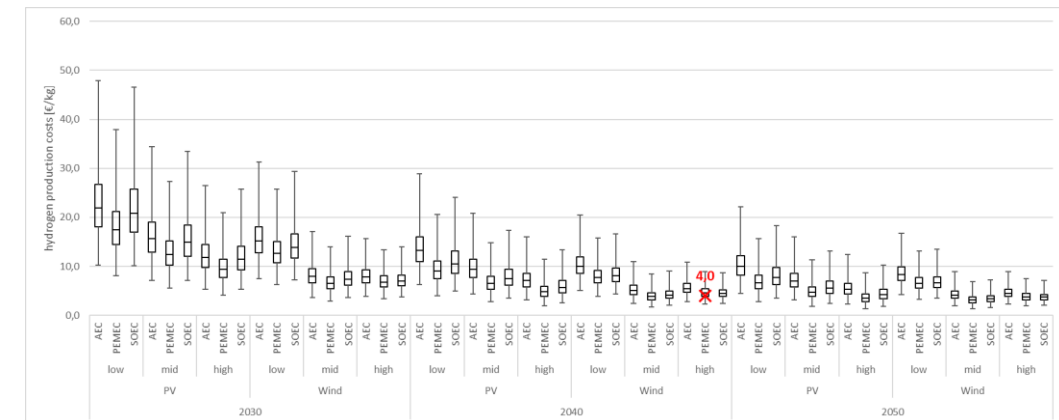


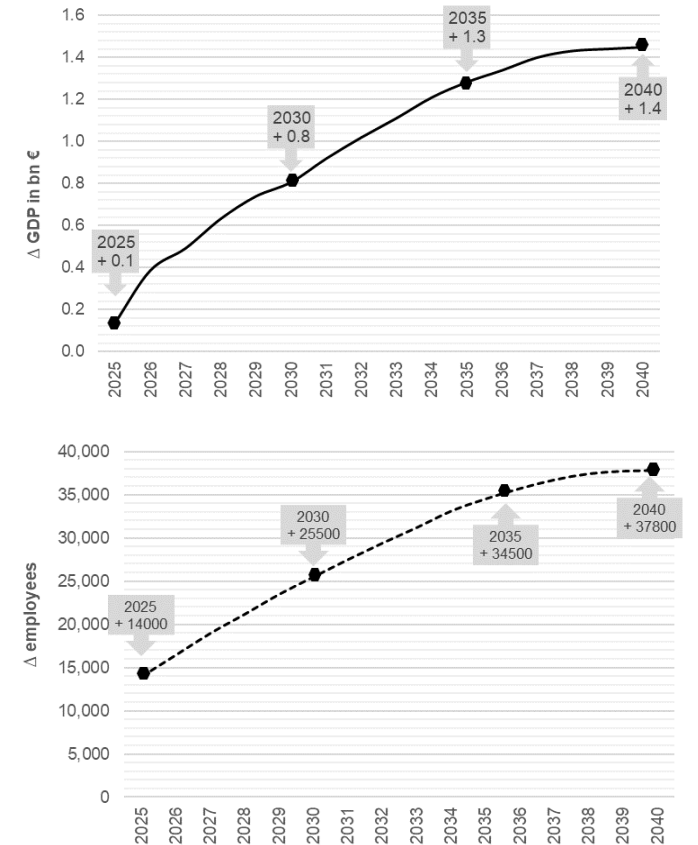
Figure: Range of hydrogen production costs due to parameter variation. (Source: Energieinstitut an der JKU Linz)

Wasserstoff

Volkswirtschaftliche Effekte

- Mögliches Szenario:
 - Österreich, 2025-2040,
 - BAU scenario: No integration of renewable H₂ in the Austrian industry takes place.
 - Simulation scenarios: Integration of renewable H₂ (59.5 TWh by 2040) into Austrian industrial processes
- Durch die Integration von erneuerbarem H₂ in der Industrie lassen sich, basierend auf den Ergebnissen der ex-ante makroökonomischen Simulationsanalysen, **positive Effekte auf die österreichische Wirtschaft identifizieren**.
- Haupttreiber:
 - Zusätzliche **Investitionsimpulse** durch Ausbau der H₂-Produktion
 - Erhöhung der Wertschöpfung durch H₂-Produktion
 - Auswirkungen auf die **Handelsbilanz** (Nettoexporte): Substitution von Gasimporten (positiv), Importe von notwendigen Komponenten der Elektrolyse- & Produktionsinfrastruktur (negativ), Importe von Strom für Elektrolyse (negativ), Einfuhren von H₂ (negativ)
 - **Mehrrundeneffekte** (z.B. Konsumeffekte durch erhöhte Beschäftigung)

GDP and employment effects



Notes: Nominal and net values. Results include direct, indirect and induced effects compared to the BAU scenario where no integration of renewable H₂ and SNG in the Austrian industry takes place. Source: Own calculation based on MOVE2, February-March 2023, Energieinstitut at the JKU Linz.

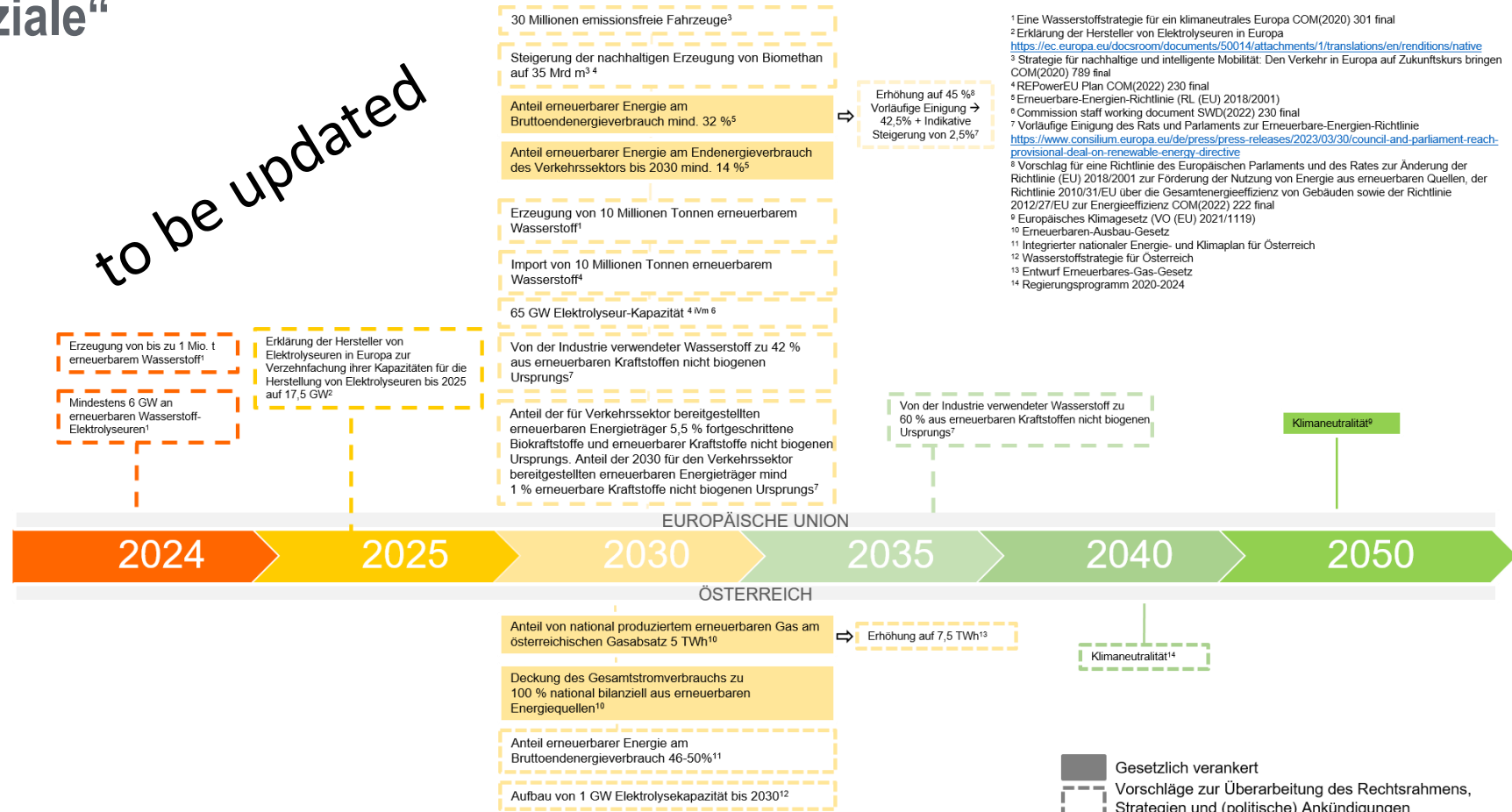
Rechtliche und Regulatorische Rahmenbedingungen

Status quo und „Potenziale“

Potenziale:

- Regulierung der **Finanzierung** der Wasserstoff-Infrastruktur (Wasserstoffförderungsgesetz, Entwurf in Begutachtung)
- Neue Regulierung für die **saisonale Strom-Langzeitspeicherung** via H₂
- Integration von Elektrolyseuren als Speicher im Energierecht / Anreizsetzungen für systemische Energiespeicher
- Netzgebühren-Modifizierungen für die Sektorkopplung
- Weiterentwicklung des **Herkunftsnachweis-Systems**

to be updated



¹ Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa COM(2020) 301 final
² Erklärung der Hersteller von Elektrolyseuren in Europa <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/50014/attachments/1/translations/en/renditions/native>
³ Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen COM(2020) 789 final
⁴ REPowerEU Plan COM(2022) 230 final
⁵ Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RL (EU) 2018/2001)
⁶ Commission staff working document SWD(2022) 230 final
⁷ Vorläufige Einigung des Rats und Parlaments zur Erneuerbare-Energien-Richtlinie <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/30/council-and-parliament-reach-provisional-deal-on-renewable-energy-directive>
⁸ Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sowie der Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz COM(2022) 222 final
⁹ Europäisches Klimagesetz (VO (EU) 2021/1119)
¹⁰ Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz
¹¹ Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich
¹² Wasserstoffstrategie für Österreich
¹³ Entwurf Erneuerbares-Gas-Gesetz
¹⁴ Regierungsprogramm 2020-2024

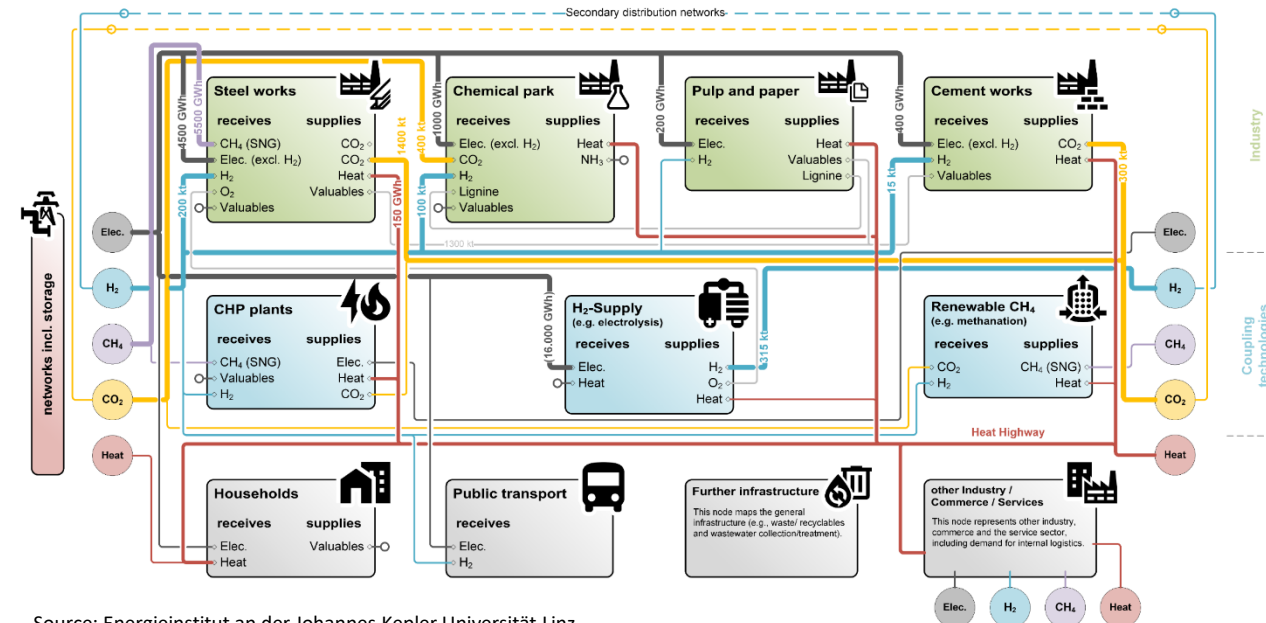
Source: Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Wasserstoff als Wegbereiter

Sektorkopplung und Kohlenstoffmanagement

- Wasserstoff hat das Potenzial, ein wichtiger **Wegbereiter für die Sektorkopplung** zu sein, die ein wichtiger Aspekt für
 - industrielle Symbiose,
 - Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft, Versorgungssicherheit und
 - Verringerung des Primärenergiebedarfs
- Bei der Umsetzung der Sektorkopplung wird die H₂-Produktion und -Versorgung das **wichtigste Bindeglied** sein.

Vision of an integrated, climate-neutral regional energy system



Source: Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Wasserstoff ...

... ein zentraler Baustein des zukünftigen Energiesystems

- kann fossile Energieträger in allen Bereichen ersetzen – ist aber nicht überall sinnvoll.
- sollte primär dort für die Reduktion von Treibhausgasen eingesetzt werden, wo es keine (absehbaren) Alternativen gibt.
 - Industrieprozesse (chemische Produkte, Stahlerzeugung, hohe Temperaturen), Langstrecken- und Schwerkverkehr (Luft- und Schifffahrt), Versorgungssicherheit (Speicherung, Spitzenlasten)
- wird auch importiert werden müssen, um den heimischen Bedarf zu decken – aber auch fossile Energien werden heute Großteils importiert.
- braucht auch Infrastruktur und Erzeugungskapazitäten (inkl. Strom), die entsprechend rasch aufgebaut/umgesetzt werden müssen.
- Bedarf der Weiterentwicklung der regulatorischen Aspekte
- ist ein komplexes Zusammenspiel vieler Einzellösungen, hier sind ganzheitliche Methoden/Lösungen gefragt: Integration von technischen, ökonomischen, sozialen, ökologischen (etc.) Aspekten

Ing. Andreas Zauner

Senior Researcher – Energy Technologies

**Energieinstitut an der Johannes Kepler
Universität Linz**

Altenberger Straße 69

4040 Linz, AUSTRIA

Tel: +43 723 2468 5656

e-mail: zauner@energieinstitut-linz.at



**AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT:
MULTIDISZIPLINÄRE ANSÄTZE FÜR EINE NACHHALTIGE
WASSERSTOFFWIRTSCHAFT**