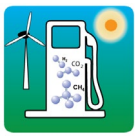


Weissbuch Power-to-X: Perspektiven in der Schweiz mit Fokus auf den Verkehrssektor

T. Kober, C. Bauer, C. Bach, M. Beuse, G. Georges, M. Held, S. Heselhaus, P. Korba, L. Küng, A. Malhotra, S. Moebus, D. Parra, J. Roth, M. Rüdisüli, T. Schildhauer, T.J. Schmidt, T.S. Schmidt, M. Schreiber, F.R. Segundo Sevilla, B. Steffen, S.L. Teske

ETH Tagungsreihe *Aspekte der individuellen Mobilität*

“Treibstoffe aus erneuerbaren Energien”, ETH Zürich, 30.01.2020



SCCER Joint Activity Power-to-X



biosweet

Biomass for Swiss Energy Future
Swiss Competence Center for Energy Research





Transformation des Energiesystems

- **Pariser Klimaabkommen:** drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen
- **Energiestrategie 2050:** Zunahme des Anteils Solar-PV und Windenergie im Stromsystem bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie
- **P2X Technologien als eine mögliche zukünftige Flexibilitäts- und Emissionsreduktionsoption**

Ziele des Weissbuchs

- Zusammentragen des bestehenden Wissens zu P2X Technologien sowie Synthese und Evaluation im Schweizer Kontext
- Informationsfunktion



CO₂ Emissionen in der Schweiz im Jahr 2015 nach Sektoren
(basierend auf: FOEN 2017)



Verschiedene Perspektiven auf P2X

Strommarktperspektive

- Situation heute & in Zukunft
- Netzstabilität
- Systemdienstleistungen
- Anforderungen an Anlagengrößen & -standorte
- Marktintegration

Technologieübersicht & Techno-ökonomische Bewertung

- Power-to-X Produktionsrouten
- Schlüsselkomponenten & -prozesse
- Kosten und technische Parameter

CO₂-Quellen & -Märkte

- Biogene Quellen
- Industrielle Quellen
- Direkte Abscheidung aus der Luft

Endverbraucher-Perspektive

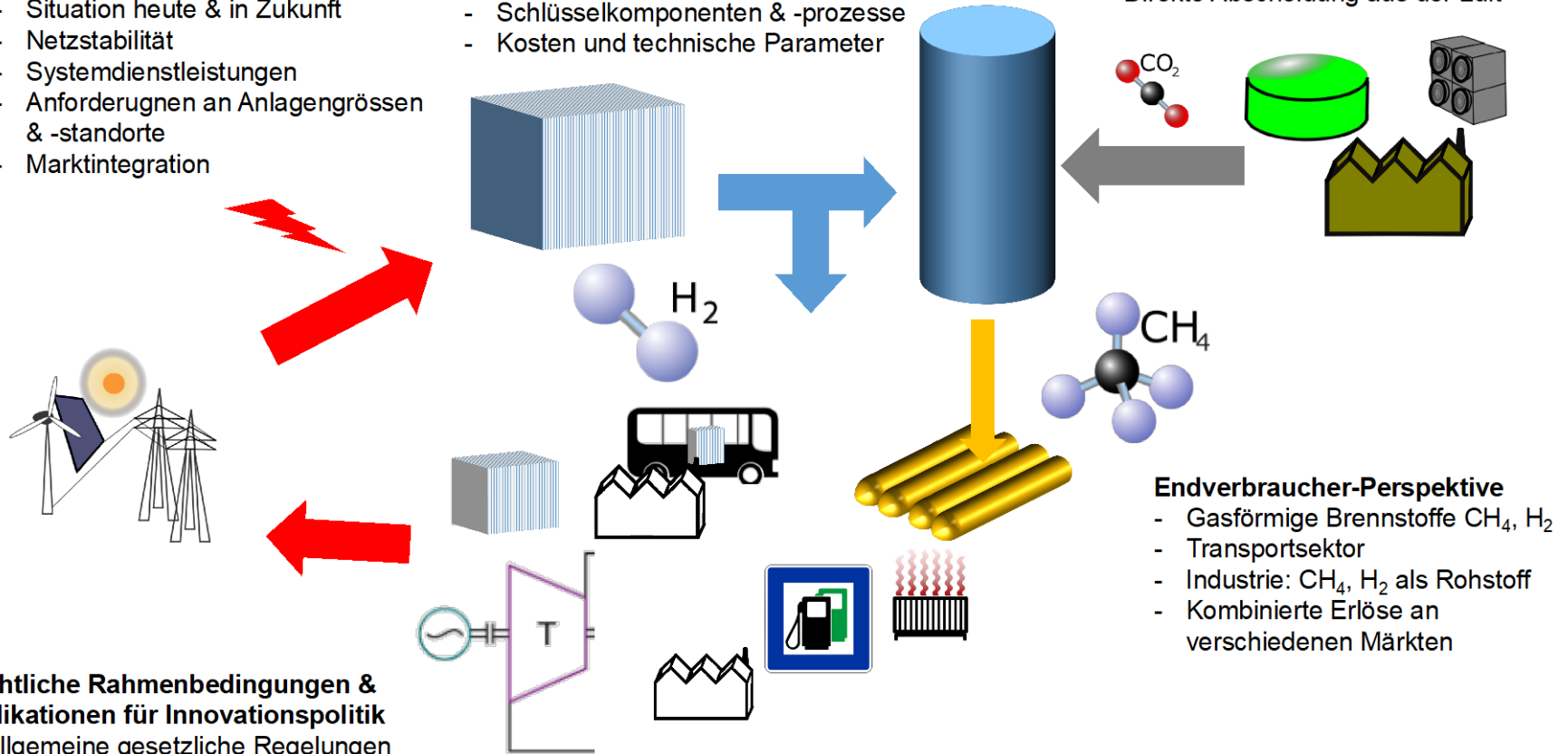
- Gasförmige Brennstoffe CH₄, H₂
- Transportsektor
- Industrie: CH₄, H₂ als Rohstoff
- Kombinierte Erlöse an verschiedenen Märkten

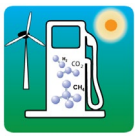
Rechtliche Rahmenbedingungen & Implikationen für Innovationspolitik

- Allgemeine gesetzliche Regelungen
- Marktregulierungen
 - Gasmarkt
 - Strommarkt
 - Wärmemarkt
- Schwerpunkte für Innovationspolitik

Umweltperspektive

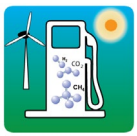
- Ökobilanz (mit Endnutzung der Produkte)
- Vergleich mit konventionellen Alternativen



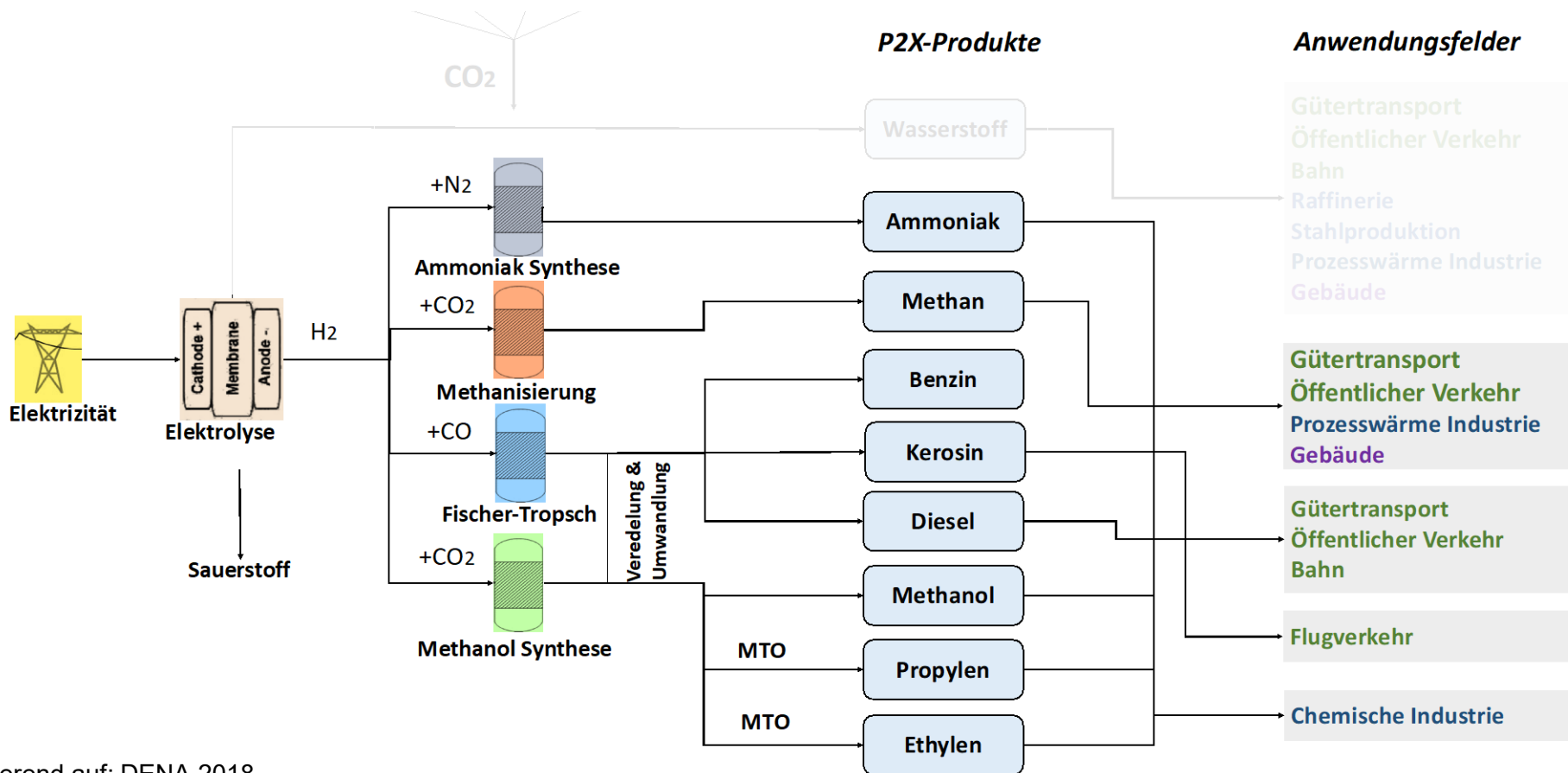


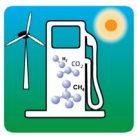
Wasserstoff als Energieträger für Endverbraucher



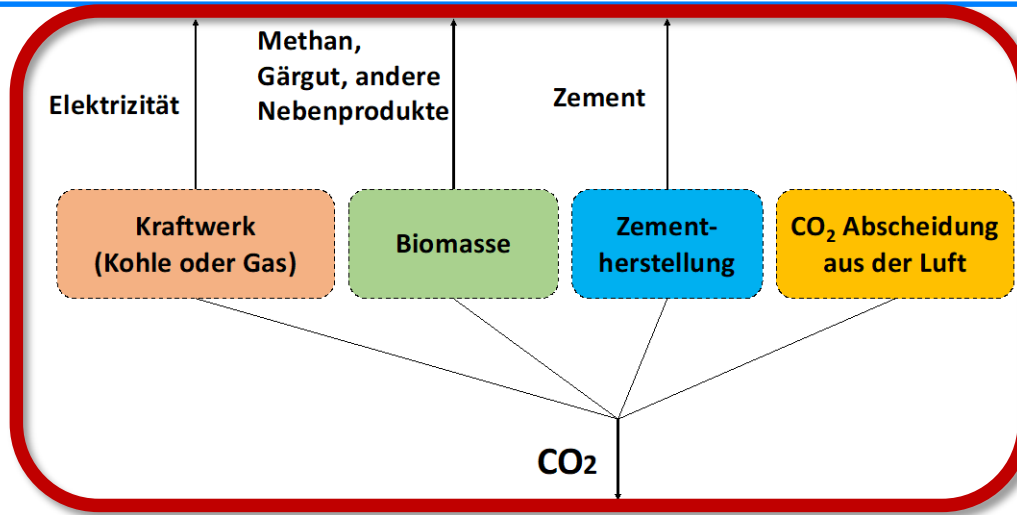


Synthetisches Methan bzw. synthetische Flüssigkeiten als Energieträger für Endverbraucher

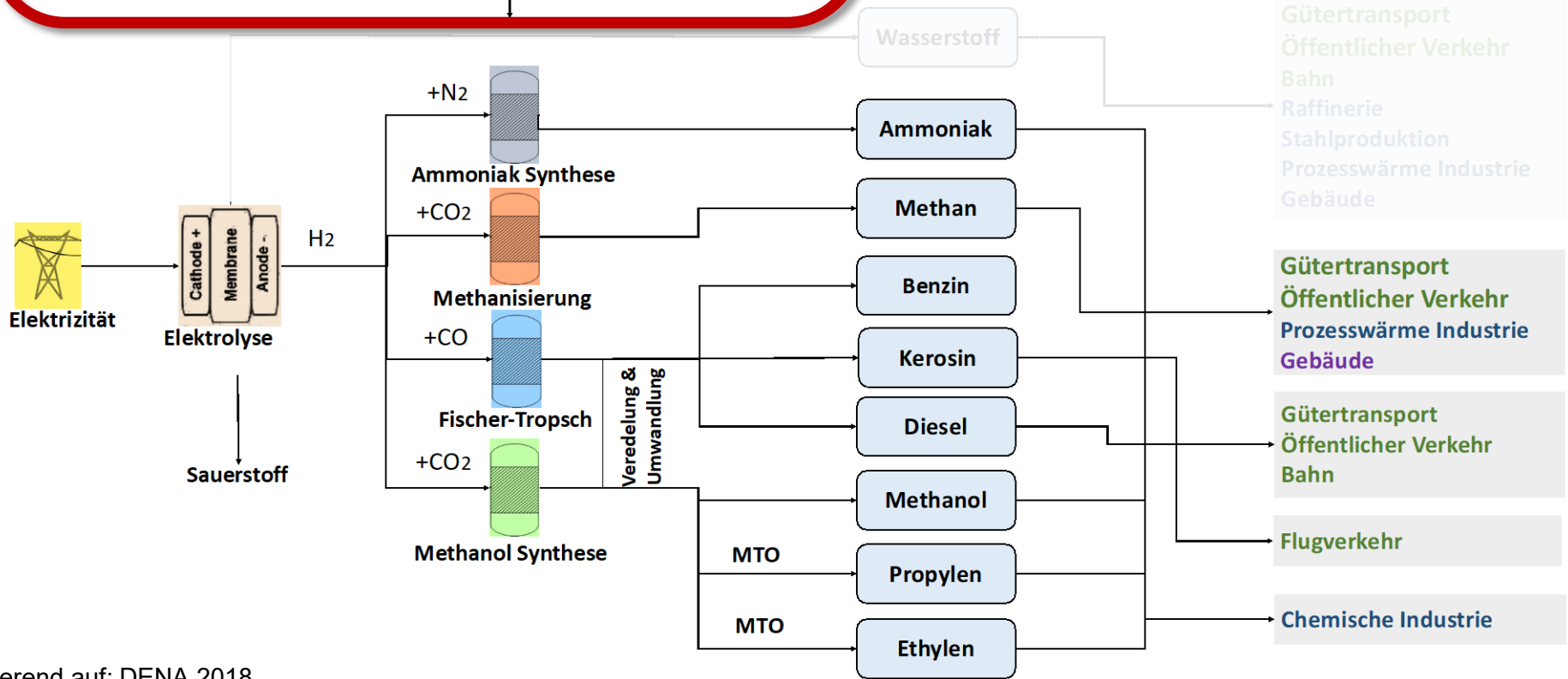




Technologieübersicht



Kohlenstoffquellen für synthetische Kraft-/Brennstoffe





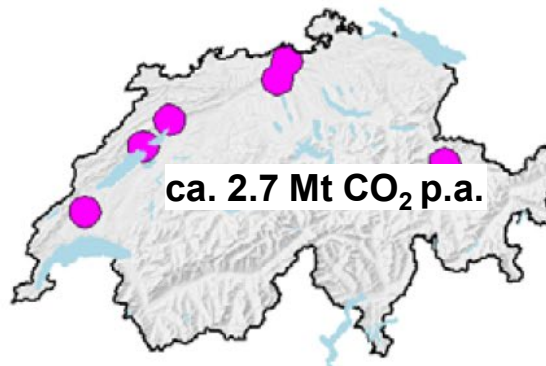
Stationäre CO₂ Quellen

- Aus technischer Sicht sind eine Reihe von CO₂ Quellen verfügbar, jedoch ist deren Nähe zu kostengünstiger Stromproduktion und/oder Netzen bzw. Abnehmern teilweise problematisch.
- Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Nutzung von Energietransportinfrastruktur von Bedeutung.

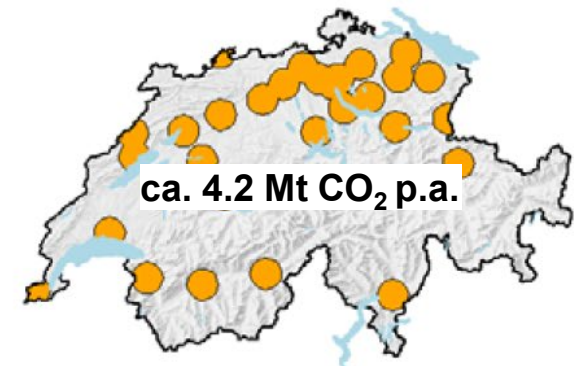
Gesamtheit der betrachteten CO₂ Quellen



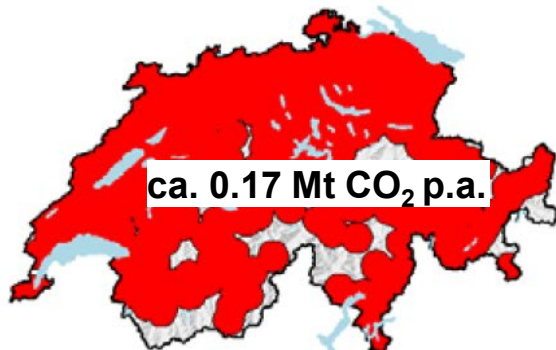
Zementwerke



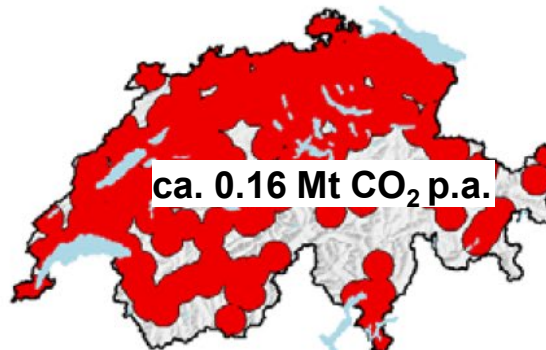
Kehrichtverbrennungsanlagen



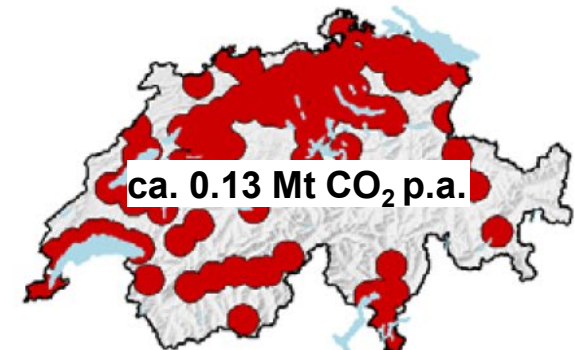
Alle Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

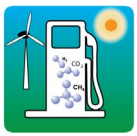


ARA Gebiete >10000 Einwohner

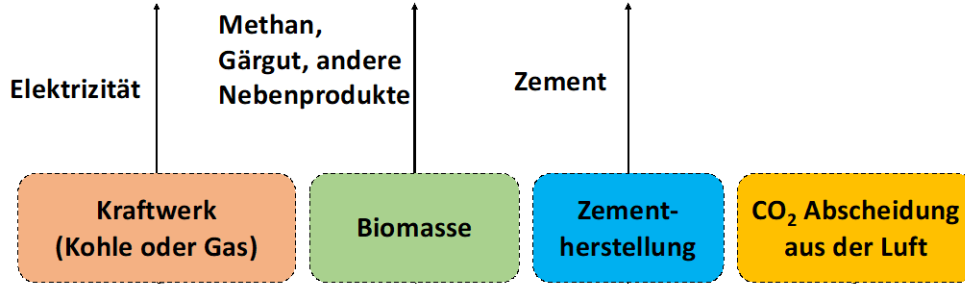


ARA Gebiete >30000 Einwohner

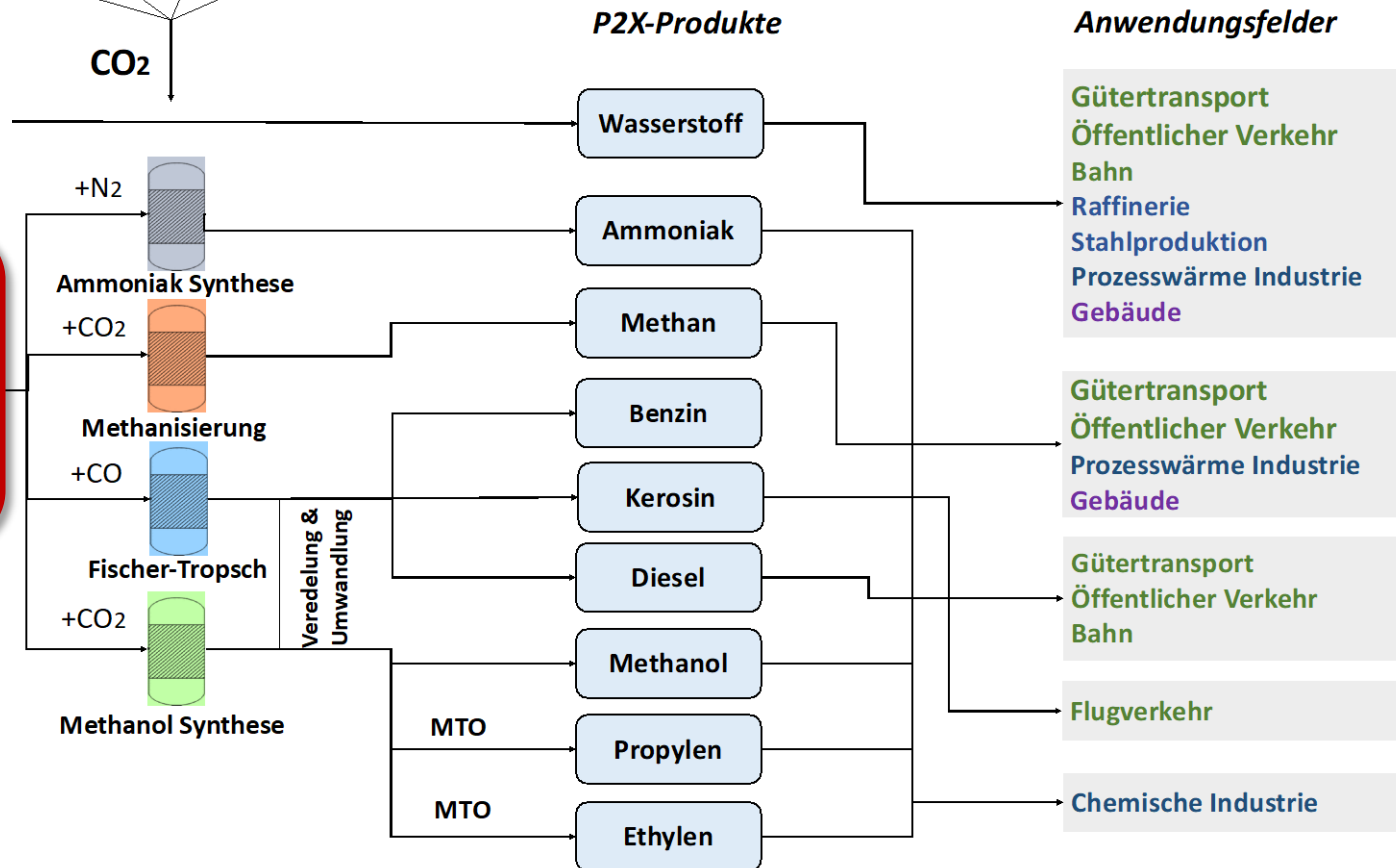
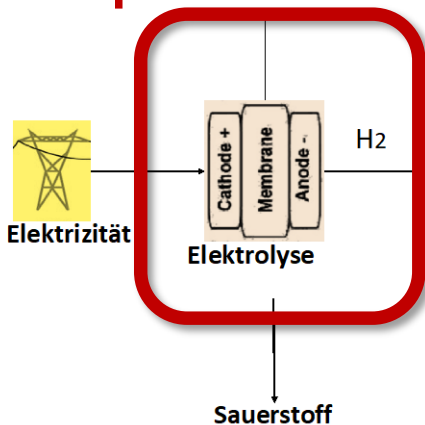


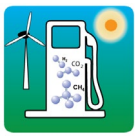


Technologieübersicht



Elektrolyseur als Kernkomponente

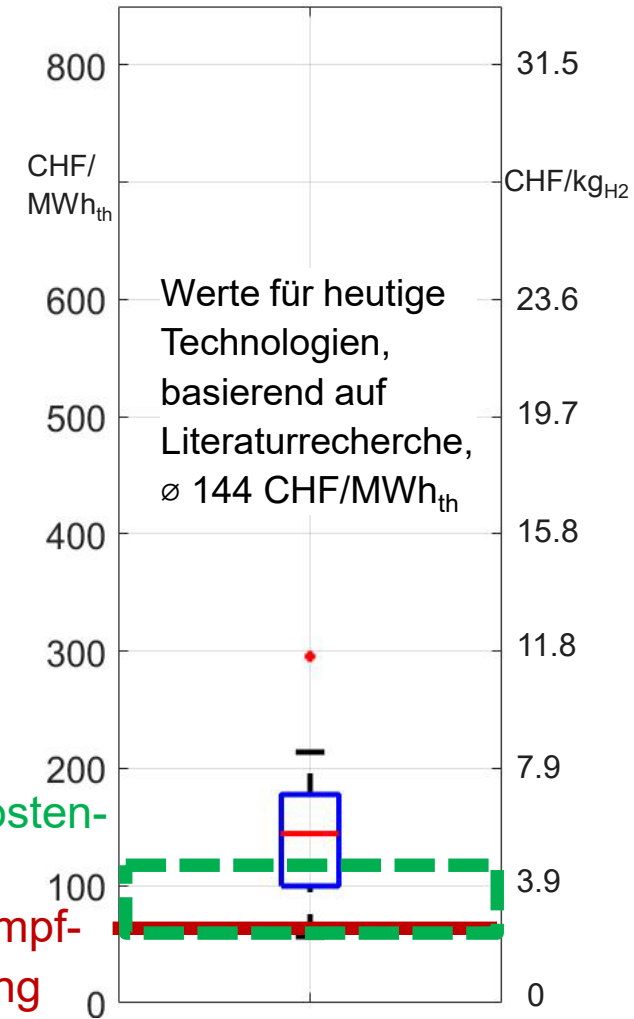




Elektrolyse-Technologien

- Alkalische Elektrolyseure heute in gross-technischer Anwendung
- Polymer-Elektrolyt-Membran-Technologie (PEM) als kleinere Anlagen; höhere Leistungsdichte und höhere Effizienz bei höheren Kosten (im Vgl. zu alkal. Elektrolyse)
- Angleichung der Kosten von alkalischen und PEM Elektrolyseuren in Zukunft möglich
- Festoxid-Elektrolysezellen in der Entwicklung (Hochtemperaturtechnologie mit hohem Wirkungsgrad)

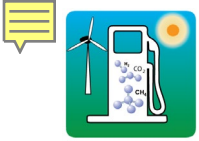
H₂-Produktionskosten



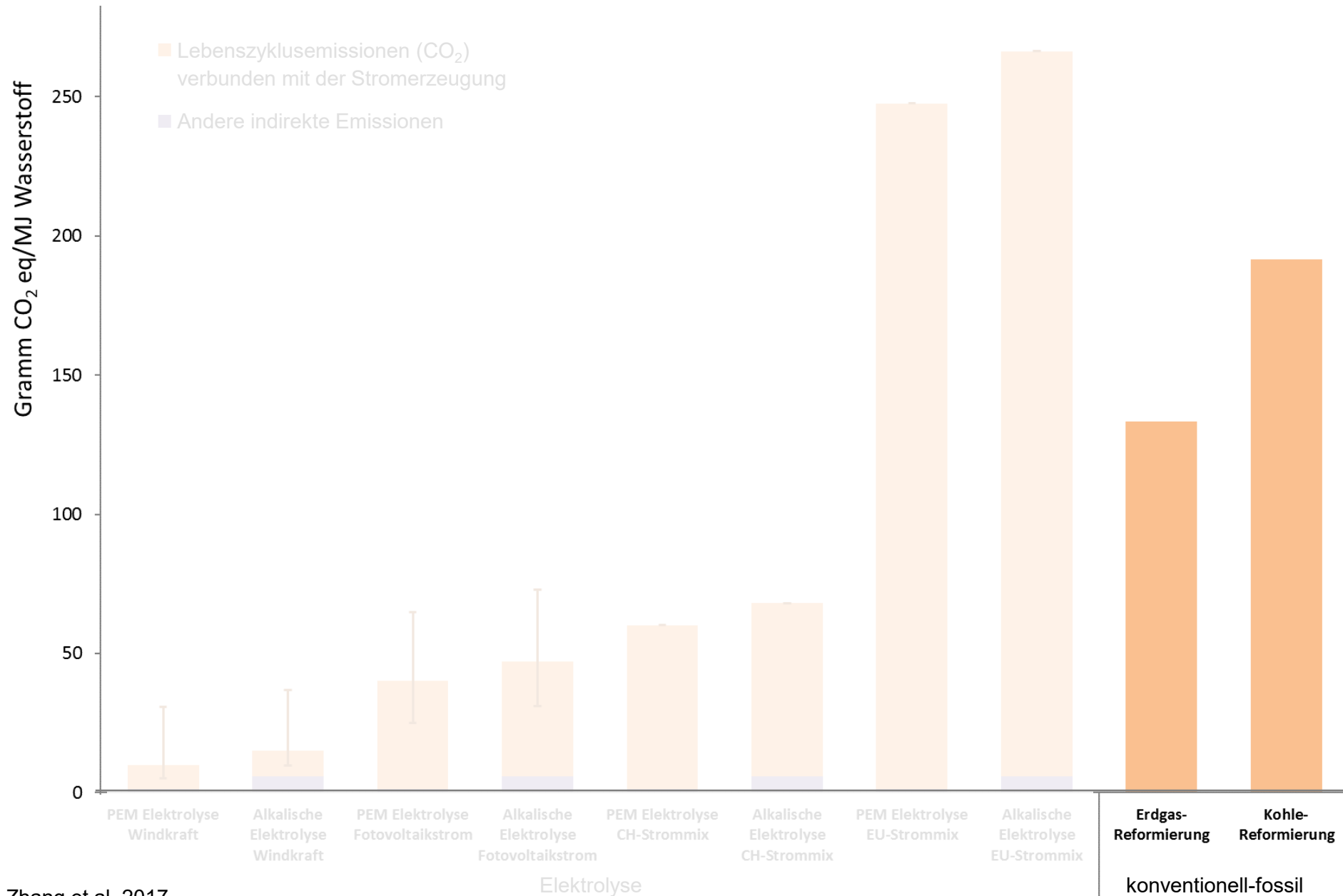
Zukünftiger Kostenbereich
Methan-Dampf-Reformierung

Kriterien für niedrige H₂ Produktionskosten:

- Bezug von kostengünstigem Strom
- Einige Tausend Vollbenutzungsstunden pro Jahr

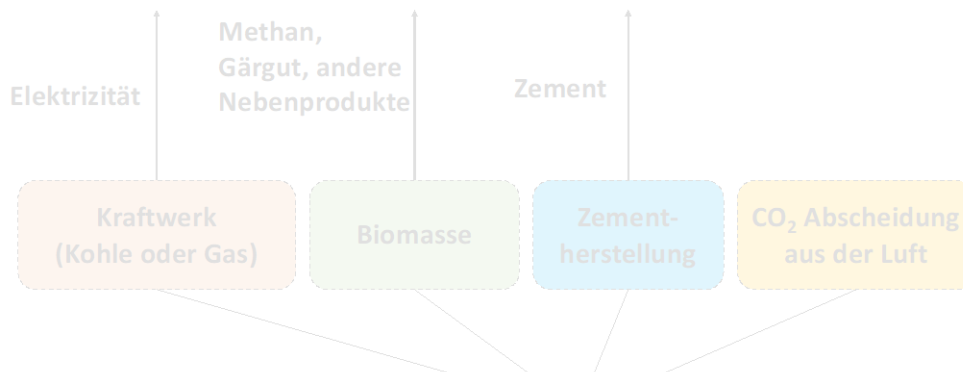


Klimaverträglichkeit der H₂ Produktion



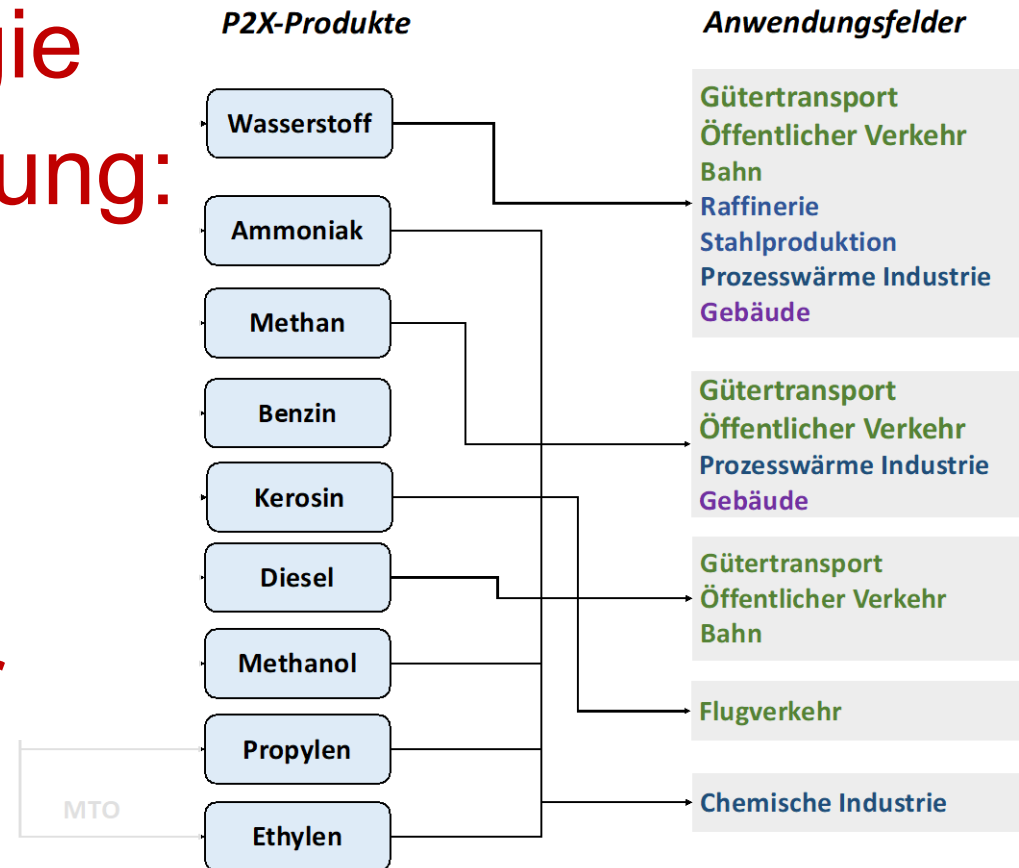


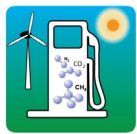
P2X in verschiedenen Märkten



P2X als Technologie zur Sektorenkopplung:

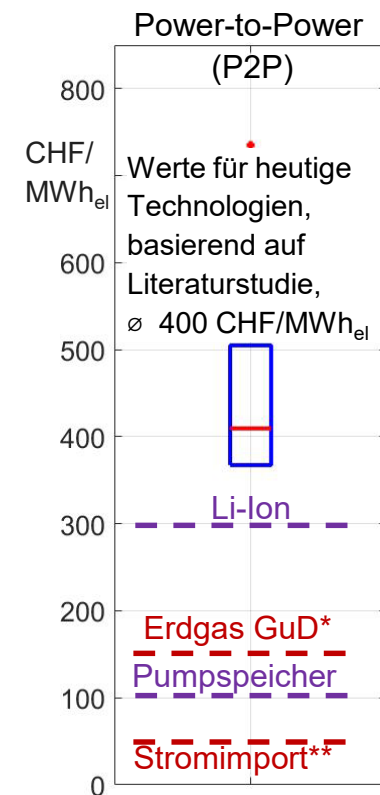
- Strommarkt
- Gasmarkt
- Industriesektor
- Transportsektor





Strommarkt-Perspektive

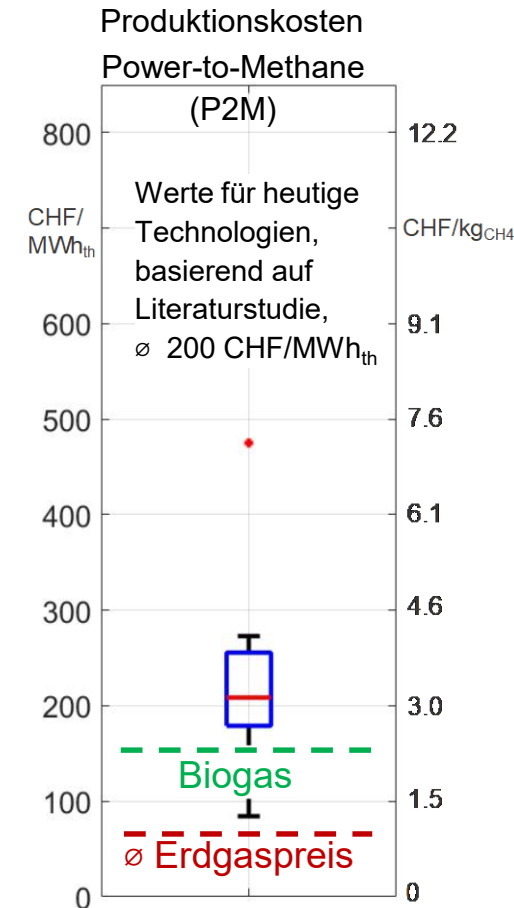
- Bei **kurzfristiger Speicherung** sind die **Kosten von P2P-Systemen** ggü. Pumpspeicherkraftwerken bzw. Li-Ion Batteriesystemen **höher**
- Für **saisonale Speicherung** sind die **Kosten von P2P-Systemen niedriger als bei Pumpspeicherkraftwerken bzw. Li-Ion Batterien**, aber auf hohem Kostenniveau (370-500 CHF/MWh)
- Für den **saisonalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage konkurriert P2P mit anderen Optionen**, wie z.B. dem Stromhandel, welche vergleichsweise geringere Kosten aufweisen können
- P2X Systeme sind technisch in der Lage Systemdienstleistungen zu erbringen (insb. im Kraftwerksverbund); **die gegenwärtigen Bedingungen auf den Märkten für Systemdienstleistungen allein bieten jedoch ungenügend Anreize für P2X.**
- **Elektrolyseure bieten Flexibilität als steuerbare Verbraucher**



Regelreserven	Wöchentliche Durchschnittsvergütung 2017 [CHF/MW]	Reserveleistung [MW]	Angebotsminimum [MW]	Angebotsmaximum [MW]	Marktvolumen (Schätzung) [Mio. CHF/Jahr]
Primärregelung	2466	±68	1	25	10
Sekundärregelung	5535	±400	5	50	120
Tertiärregelung (-)	680	-300	5	100	10
Tertiärregelung (+)	450	+450	5	100	10



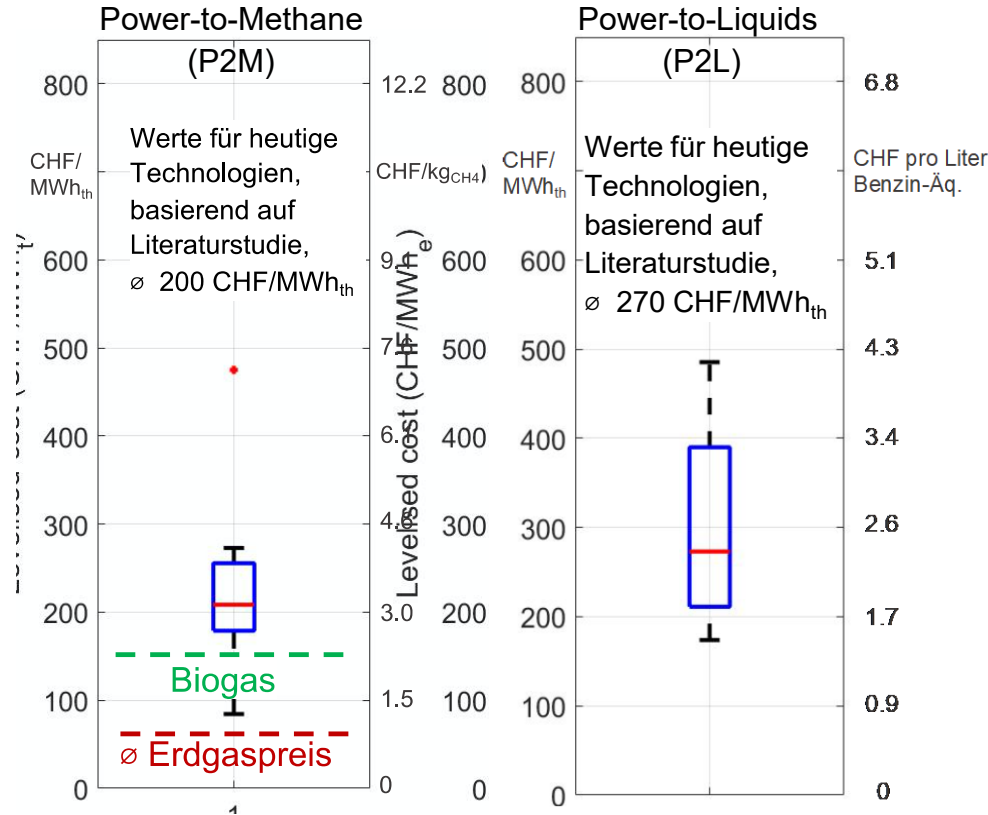
- Gegenwärtige **Preisniveaus für Erdgas etwa um Faktor 3 niedriger** als Herstellungskosten für synthetisches Methan durch P2X
- **Differenz der P2M Kosten zu Bezugspreisen für private Konsumenten wesentlich niedriger** als für industrielle Verbraucher
- **Mögliche Kostenparität für private Konsumenten, die zur Kompensation von Umweltkosten bereit sind** vergleichsweise hohe Preise (z.B. für Biomethan) mit etwa 140-160 CHF/MWh zu zahlen
- **Aus rechtlicher Sicht ist Methan aus P2X äquivalent zu erneuerbaren Gasen**
- **Private Konsumenten** als potenzielles Segment zur Einführung von synthetischem Methan im Wärmesektor
- **Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz** gegenwärtig bis zu 2% (mögliche Steigerung auf 10% in Zukunft)
- **Gasnetzzugang** für P2X-Anlagen kann über *Rohrleitungsgesetz* oder über *Kartellgesetz* sichergestellt werden





- **Hohe Energiedichte** synthetischer Kraftstoffe.
- Ohne Steuern sind synthetische Kraftstoffe **2-3 mal teurer als fossile Kraftstoffe**.
- Die Kosten für die Kraftstoffverteilungsinfrastruktur richten sich stark nach dem Ausnutzungsgrad.
- Verglichen mit Batteriefahrzeugen benötigen synthetische P2X-Treibstoffe das **3-4-Fache an Energie**.
- Mobilitätsverhalten hat Einfluss auf P2X-Treibstoffe als Alternativen zu direkter Elektrifizierung.
- Als Treibstoffe sind **Wasserstoff, synthetische Kohlenwasserstoffe** (Methanol, e-Benzin und e-Diesel) **von der Mineralölsteuer befreit**, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurden und gewisse Umweltvorschriften erfüllen.

Produktionskosten synthetischer Kraftstoffe



P2L im frühen Entwicklungsstadium
→ F&E zur Kostenreduktion notwendig

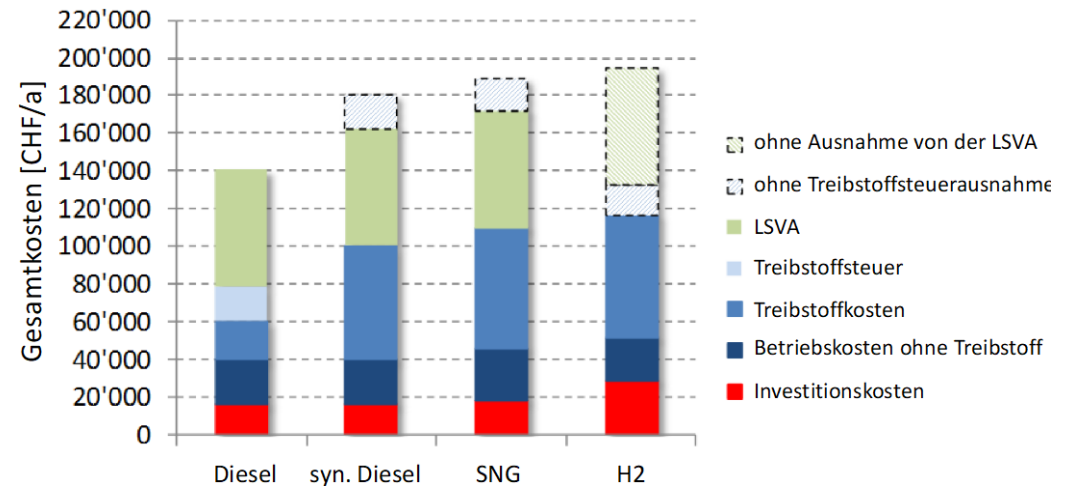


Generell ist der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten für Strassenverkehrsfahrzeuge eher gering, was den **Transportsektor als möglichen Eintrittsmarkt für synthetische Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff** attraktiv macht.

LKW:

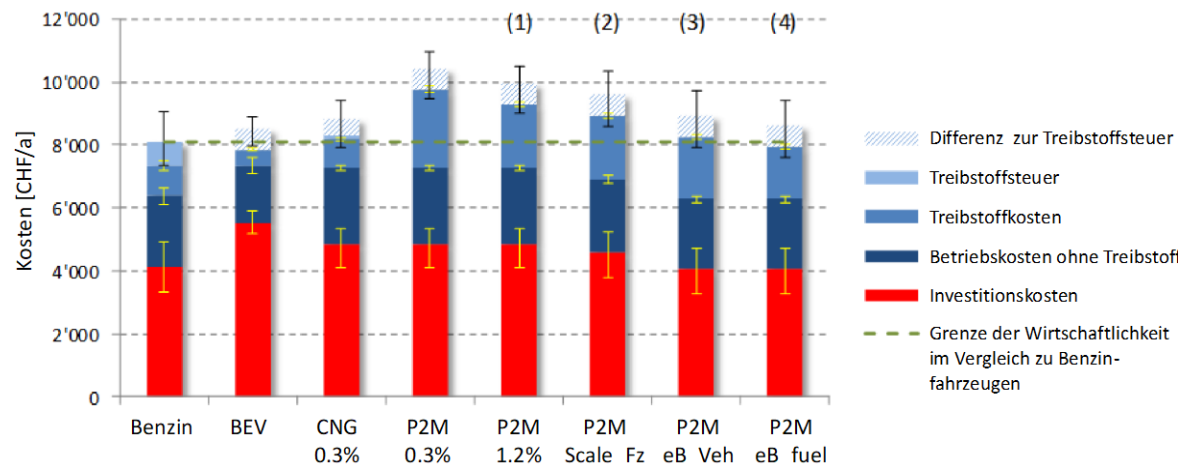
Momentan sind H₂-LKW von der LSVA befreit, was ihre Kosten ggü. Diesel-LKW stark begünstigt.

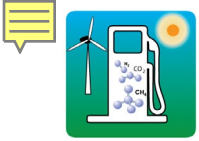
Dies wäre auch eine Option, um LKW mit synthetischem Diesel bzw. Methan zu fördern.



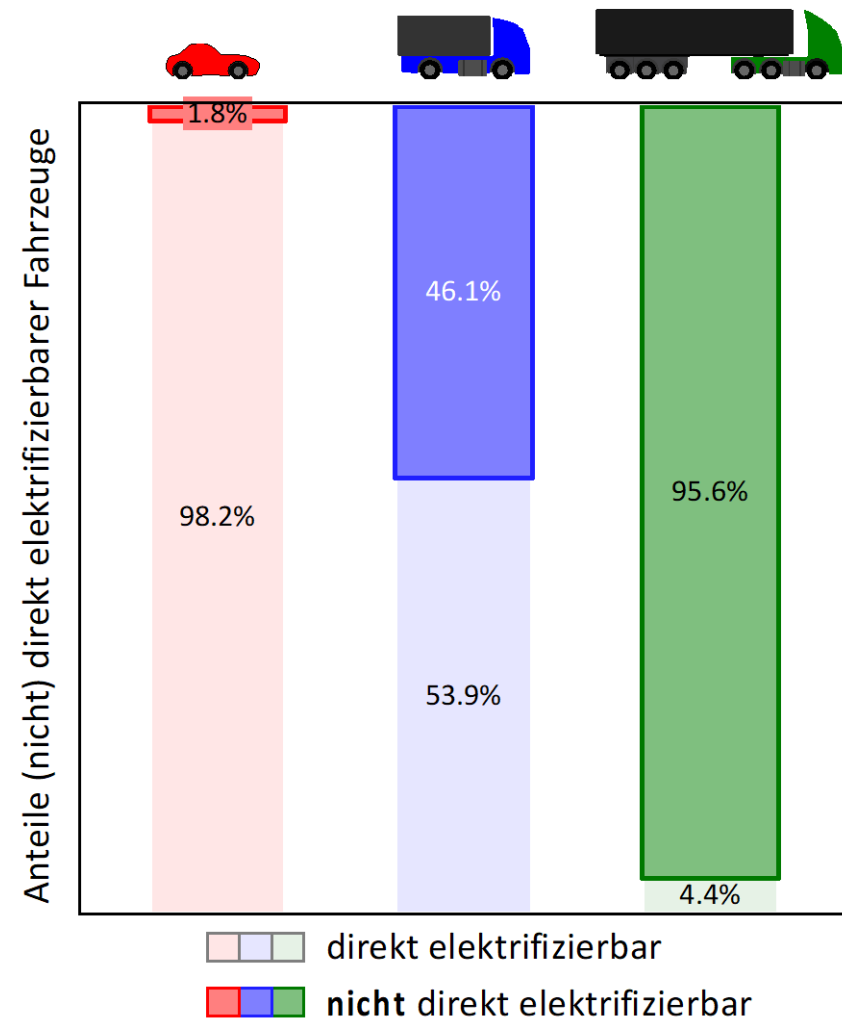
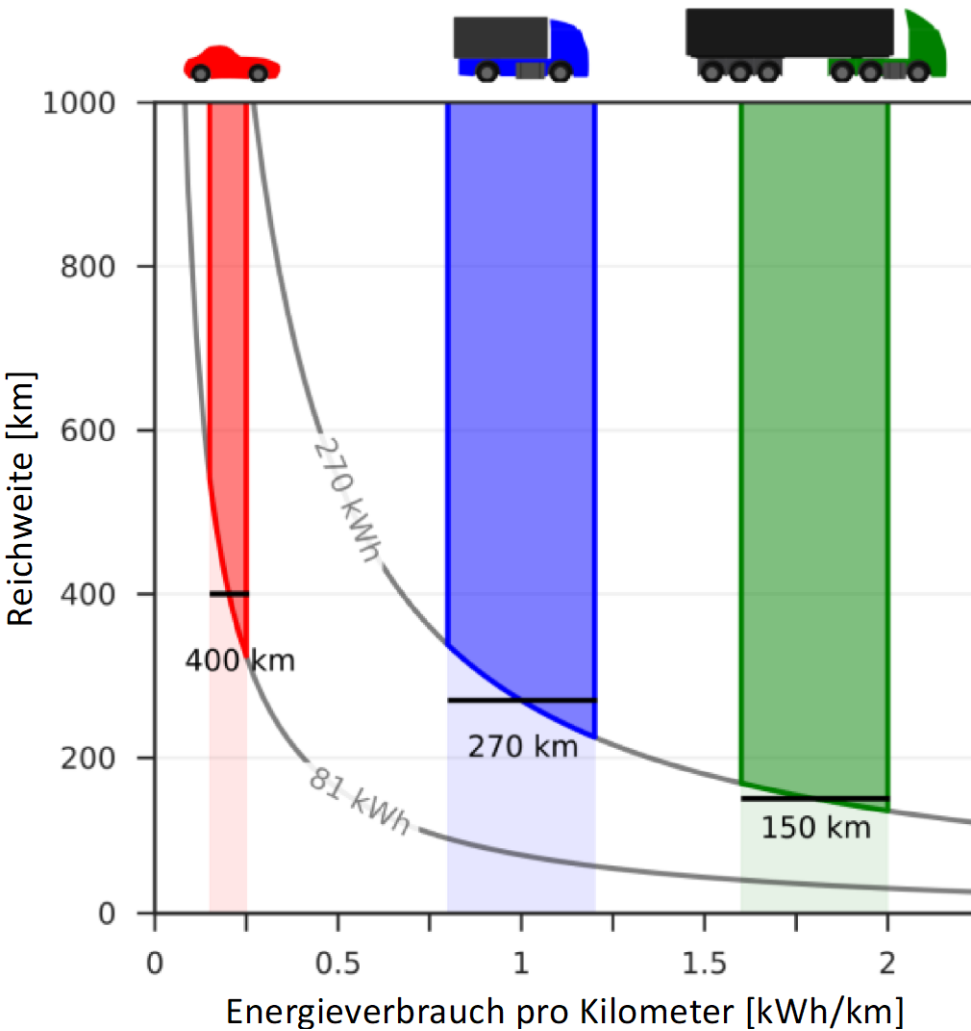
PKW:

Wenn Skaleneffekte (z.B. Vervielfachung der CNG Verkäufe) erreicht werden können (1) & (2) und die ökologische Vorteile der Fahrzeuge (3) sowie der Treibstoffe (4) berücksichtigt werden, können PKW mit synthetischem Methan ggü. Benzin-PKW wettbewerbsfähig sein.





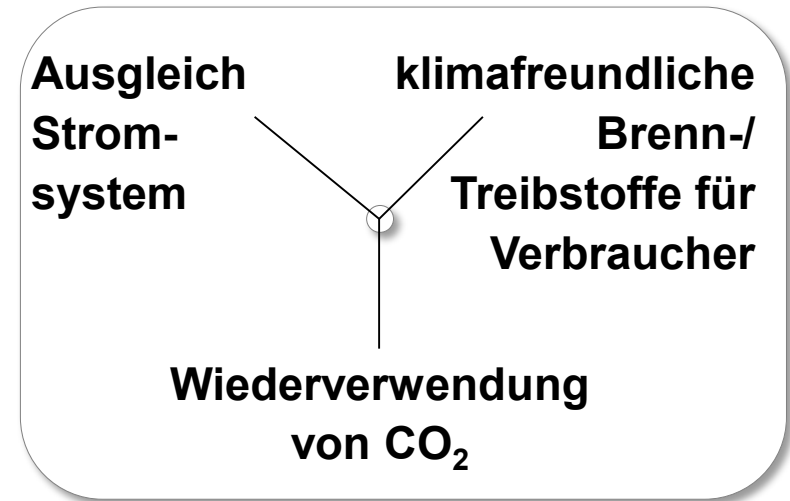
Elektrifizierung im Transportsektor

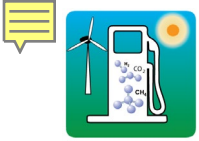


Held et al. 2018



- **Der Wert von P2X-Systemen entfaltet sich in der Kombination der verschiedenen Vorteile.**
- **Standortwahl** ist ein essentielles Kriterium für die erfolgreiche Integration von P2X-Systemen.
- P2X ist eine Technologie, welche entscheidend vom Angebot an **kostengünstigem Strom** abhängt.
- **Der rechtliche Rahmen** (insbesondere Zugang und Kosten zu Transportinfrastruktur) hat starke Auswirkung auf die Kostenstruktur von P2X Technologien. So spielt es beispielsweise eine Rolle, ob P2X als Stromverbraucher angesehen wird und Netznutzungsgebühren zu entrichten sind, was sich wiederum auf die Standortwahl und das ausschöpfbare P2X Potenzial auswirkt.
- **Wertschöpfung aus den P2X-Co-Produkten** (Wärme und Sauerstoff),
- Mit neuen Geschäftsmodellen in ausgewählten Marktsegmenten kann P2X zukünftig zur kosteneffizienten **Erreichung der Schweizer Klimaziele** beitragen.



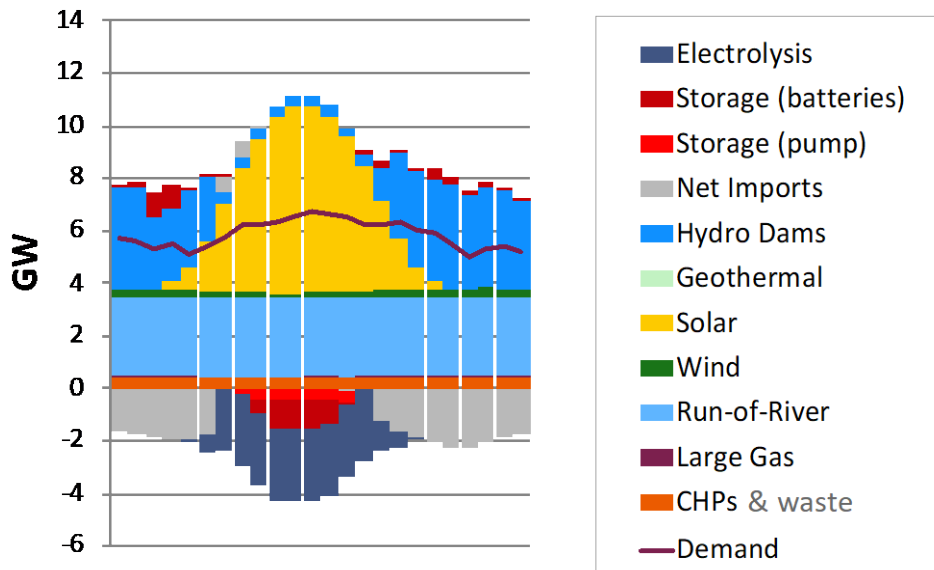


P2X als Flexibilitätsoption

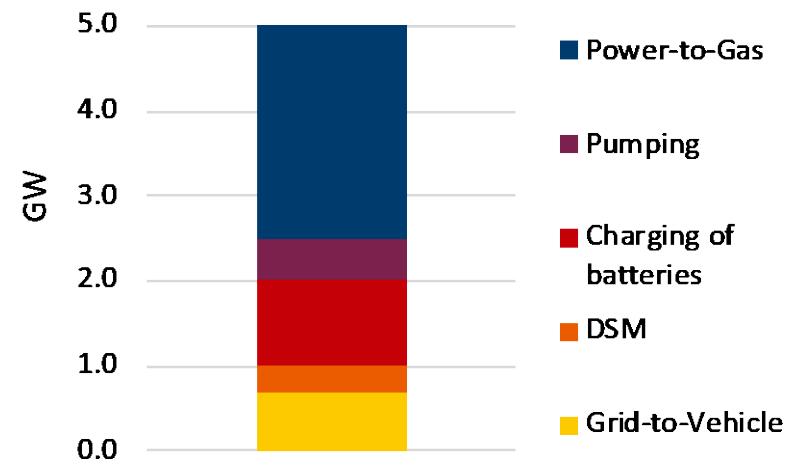
P2X komplementär zu anderen Flexibilitätsoptionen im Elektrizitätssektor zur verbesserten Integration erneuerbarer Energien

- Flexibler Stromverbraucher durch Wasserstoffspeicherung
- Netzstabilität

Summer Saturday electricity mix in Climate scenario, 2050

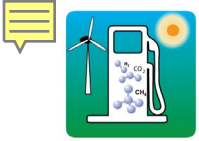


Contribution of flexibility options in absorbing excess electricity (12h, Summer Saturday)

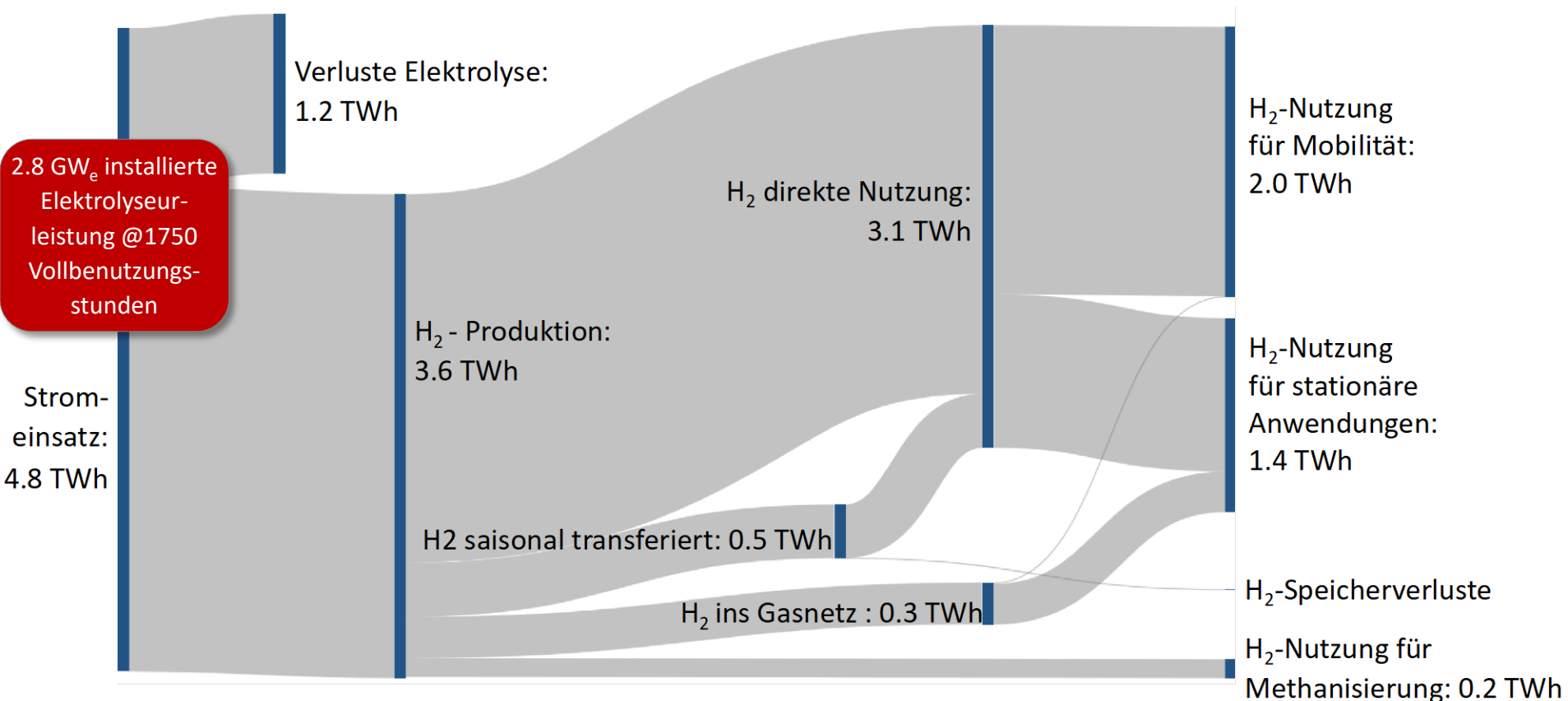


Grafiken zeigen die Ergebnisse eine Optimierungsmodells für das Schweizer Energiesystem

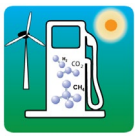
Quelle: Panos et al. 2019



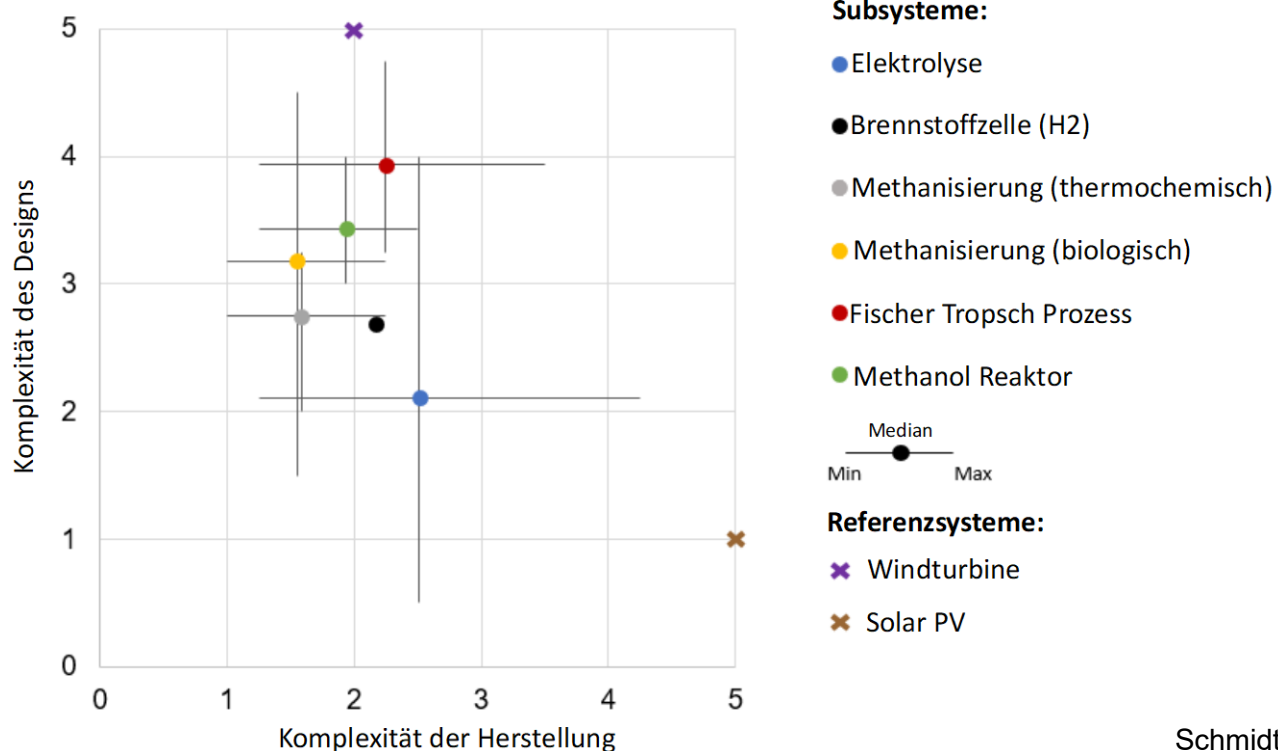
Sankey-Diagramm zeigt eine mögliche Kombination von Wasserstofferzeugung und –verbrauch für die Schweiz für das Jahr 2050 unter der Annahme der Existenz klimapolitischer Massnahmen (-50% CO₂ Emissionen ggü. 1990):



Panos et al. 2019



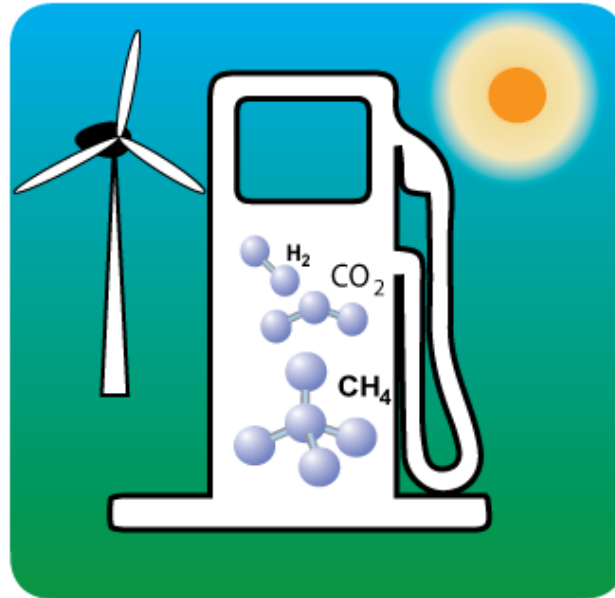
- Die meisten P2X-Subsysteme sind eher **design-intensive Technologien** – daher sind vor allem **anwendungs- und interaktionsbasierte Lernprozesse entlang der gesamten P2X-Prozesskette** relevant.
- Anregung von Innovationen vor allem durch **stabile Rahmenbedingungen**, die den **einheimischen Markt** für P2X Anlagen und anwendungsorientierte Lernprozesse fördern.



Schmidt et al. 2019



- ❑ Ehrgeizige Ziele für die **Reduzierung der CO₂-Emissionen im Inland**.
- ❑ **Beseitigung der derzeitigen Unklarheiten im Regulierungsrahmen**, bei Anerkennung der Vorteile von P2X im Stromnetz als Erzeuger und Verbraucher.
- ❑ Unterstützung der **Hochskalierung** von P2X-Pilotanlagen, um die Grösse kommerzieller Einheiten zu erreichen.
- ❑ **Stärkung des Binnenmarkts** für P2X-Produkte durch Innovationspolitik, indem P2X-Technologien in umfassenden Projektaufbauten eingesetzt werden, welche **komplette P2X-Wertschöpfungsketten abdecken**.
- ❑ **Klare Regeln für die Berücksichtigung der potenziellen Umweltvorteile von P2X-Kraftstoffen**, und diese Vorteile müssen gewinnbringend genutzt werden können.
- ❑ **Ganzheitliche integrierte Untersuchungen** zur Rolle von P2X zur Erreichung der langfristigen Energie- und Klimaziele, wobei der Systemintegration und den lokalen Aspekten (Verbrauchsstrukturen, Verfügbarkeit von Ressourcen und Infrastruktur) besondere Berücksichtigung zukommen sollte.



Unterstützt durch:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung

Bundesamt für Energie BFE

Herzlichen Dank für's Zuhören.

Das Weissbuch wurde finanziert durch **Innosuisse** und das **Bundesamt für Energie**.

Download Weissbuch (englisch, deutsch, französisch) sowie den Ergänzungsbericht unter: <http://www.sccer-hae.ch/>



- FOEN 2017 Federal Office for the Environment, “Greenhouse gas inventory” *Data, indicators and maps*, 2017.
- DENA 2018 Deutsche Energie-Agentur, *Power to X: Technologien*. Berlin: Strategieplattform Power to Gas, 2018.
- Teske et al. 2019 Teske S. et al, “Potentialanalyse Power-to-Gas in der Schweiz – Betrachtungen zu Technologien, CO₂, Standorten, Elektrizität, Wirtschaftlichkeit und Einsatz in der Mobilität” 2019.
- Zhang et al. 2017 X. Zhang, C. Bauer, C. L. Mutel, and K. Volkart, “Life Cycle Assessment of Power-to-Gas: Approaches, system variations and their environmental implications” *Appl. Energy*, vol. 190, 2017.
- Swissgrid 2017 Swissgrid, “Ausschreibungen Regelleistung” 2017.
- Bauer, Hirschberg (eds.) et al. 2017 C. Bauer, S. Hirschberg (eds.) et al., “Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies.” 2017.
- BfE (2018) Bundesamt für Energie, “Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2017”, 2018.
- Held et al. 2018 M. Held, L. Küng, E. Çabukoglu, G. Pareschi, G. Georges, K. Boulouchos, “Future mobility demand estimation based on sociodemographic information: A data-driven approach using machine learning algorithms”. *Swiss Transp. Res. Conf.*, 2018.
- Panos et al. 2019 E. Panos; T. Kober; A. Wokaun, “Long-term evaluation of electric storage technologies vs alternative flexibility options for the Swiss energy system” *Applied Energy*, 252, 2019.
- Cox and Bauer 2018 B. Cox and C. Bauer, “Umweltauswirkungen von Personenwagen – heute und morgen. Faktenblatt und Hintergrundbericht im Auftrag von energieschweiz.” 2018.