

PSI

Center for Nuclear Engineering and Sciences
Center for Energy and Environmental Sciences

Dekarbonisierung des Verkehrs: Braucht es mehr als die E-Mobilität?

Christian Bauer | Labor für Energiesystem-Analysen | Technology Assessment

CEO4Climate, 8.9.2025

Warum ist die Dekarbonisierung des Verkehrs wichtig?

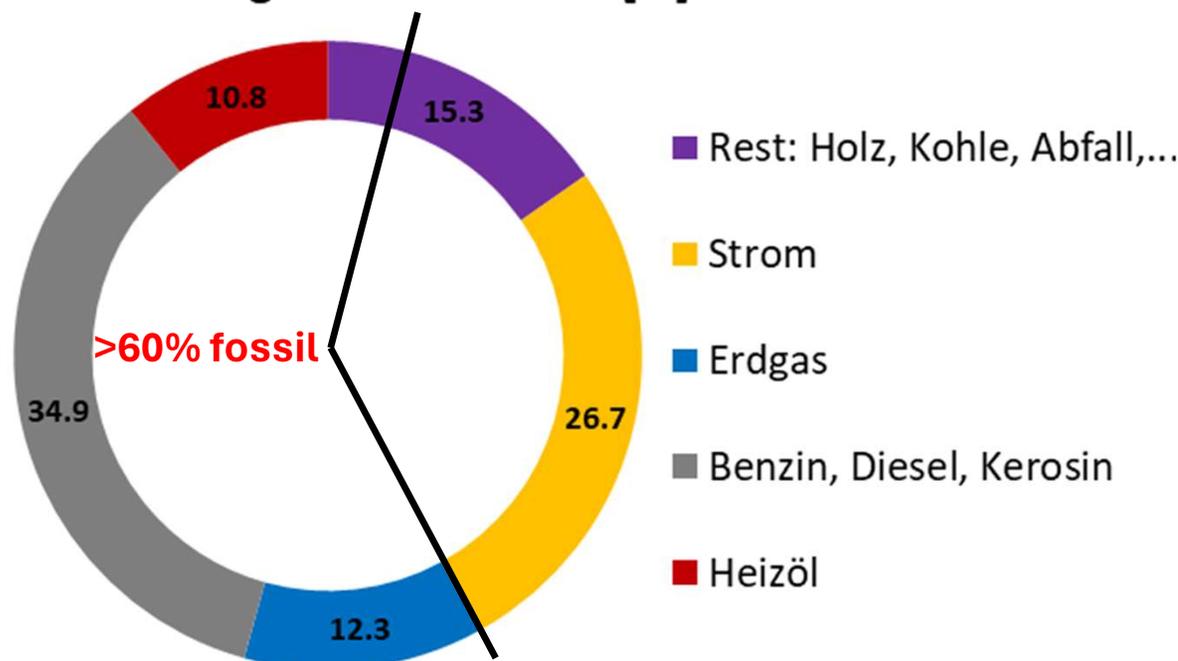


Klimaziel: Netto-Null Treibhausgasemissionen 2050

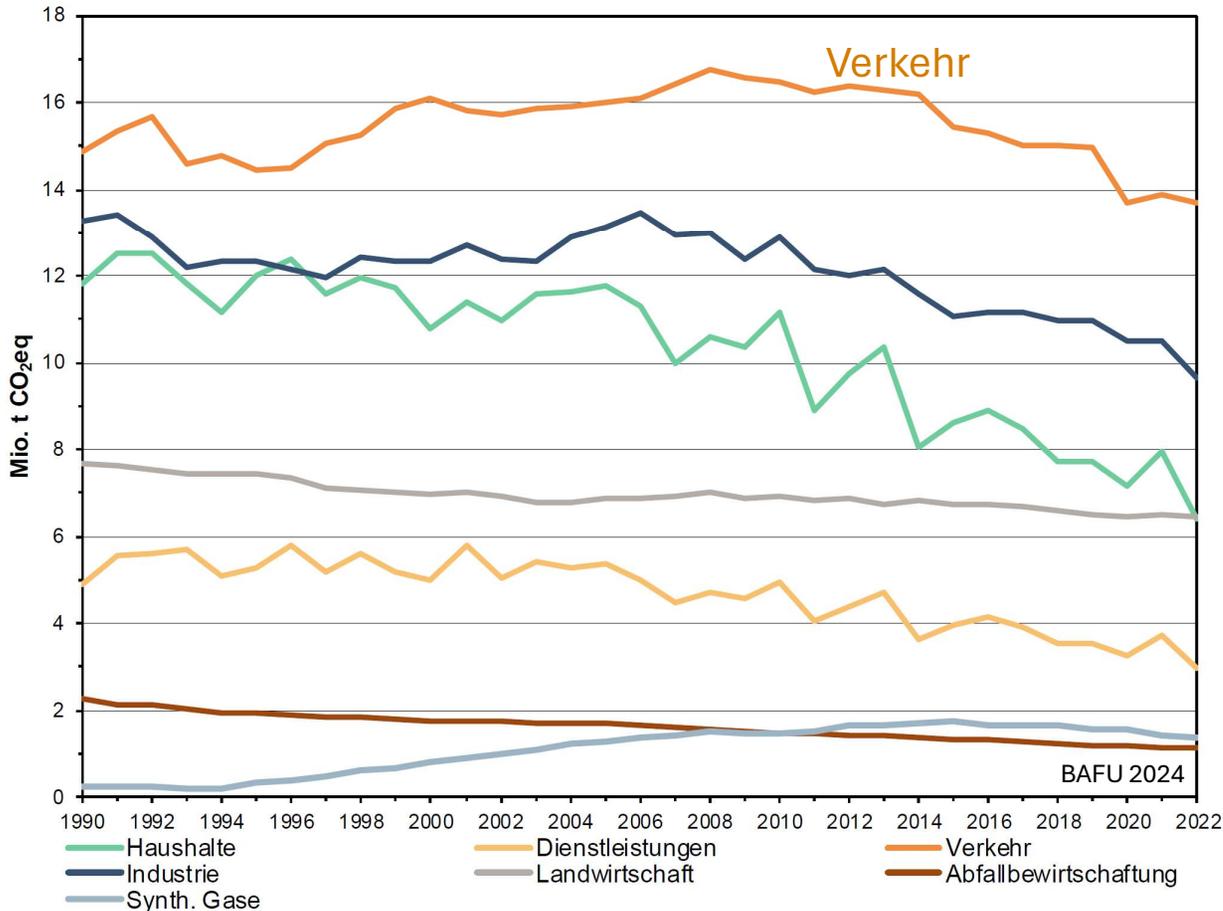
→ fossile Energieträger müssen durch nicht fossile ersetzt werden:

- I. (Traditionelle Biomasse)
- II. **Strom: Direkte Elektrifizierung**
Batteriefahrzeuge
- III. **Synthetische Brenn- und Treibstoffe**
(Wasserstoff, gasförmige & flüssige Kohlenwasserstoffe, Ammoniak,...)

Endenergie Schweiz 2024 [%]



Treibhausgasemissionen in der Schweiz

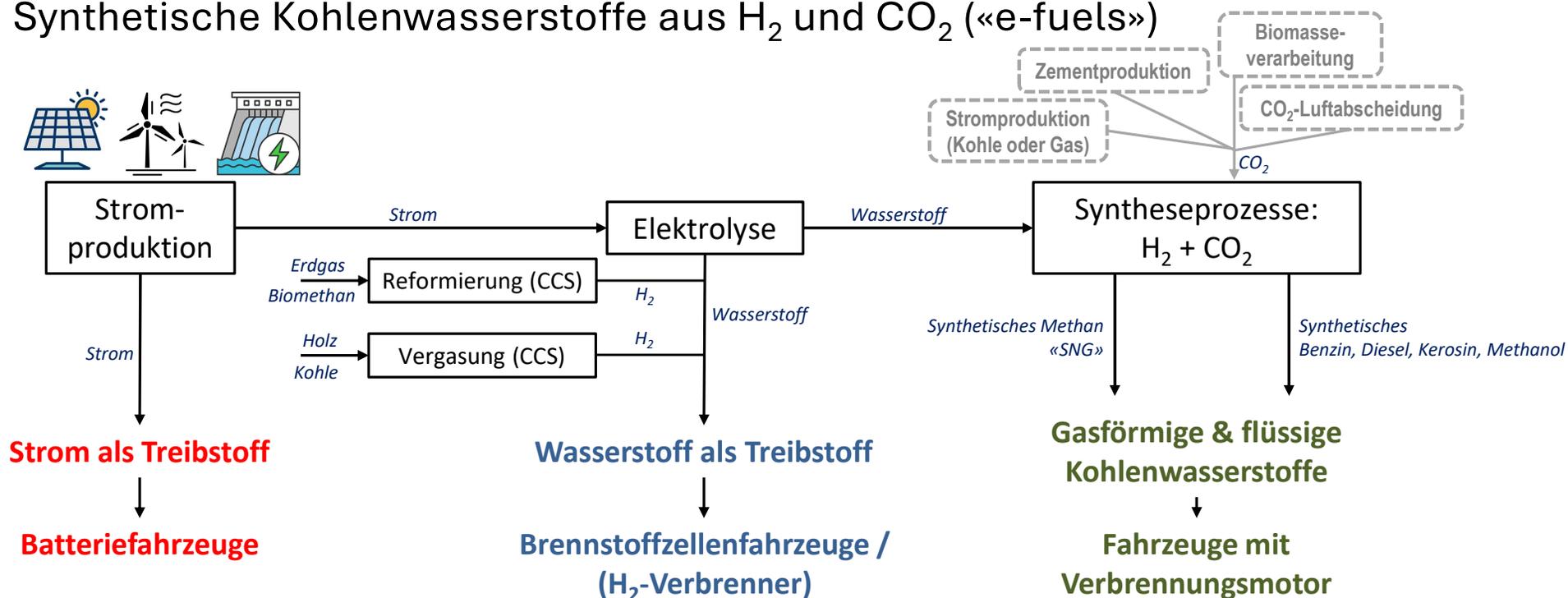


- Verkehr (ohne Flüge) ca. 1/3, davon 80% Personen, 20% Güter
- Internationale Flüge: ca. 5 Mio. t/Jahr zusätzlich



Wie lassen sich die THG-Emissionen reduzieren?

- Strom: Batterieelektrische Antriebe
- Wasserstoff: Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor
- Synthetische Kohlenwasserstoffe aus H_2 und CO_2 («e-fuels»)



Batterieelektrisch vs. H₂-Brennstoffzelle vs. “e-fuels”



	Batterie- elektrisch	Wasserstoff- Brennstoffzelle	Verbrenner mit e-fuels
Nutzung bisheriger Technologien & Infrastruktur	☹️	☹️	😊
Beitrag zur Energiespeicherung & Sektorkopplung	☹️	☹️	😊
Globaler Markt	☹️	☹️	😊
Verfügbarkeit und rascher Ausbau	😊	☹️	☹️
Energieeffizienz	😊	☹️	☹️
Kosten	😊	☹️	☹️
Nutzen für das Klima	😊	☹️	☹️

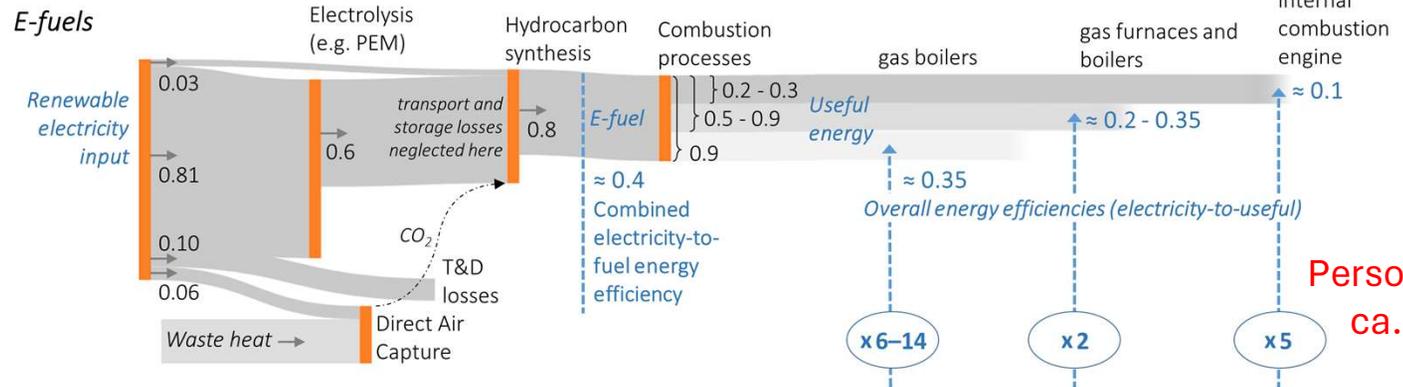
Energiebilanz: Batterieelektrisch vs. e-fuels

Electricity-to-useful energy efficiencies

Black: individual efficiencies
Blue: combined efficiencies

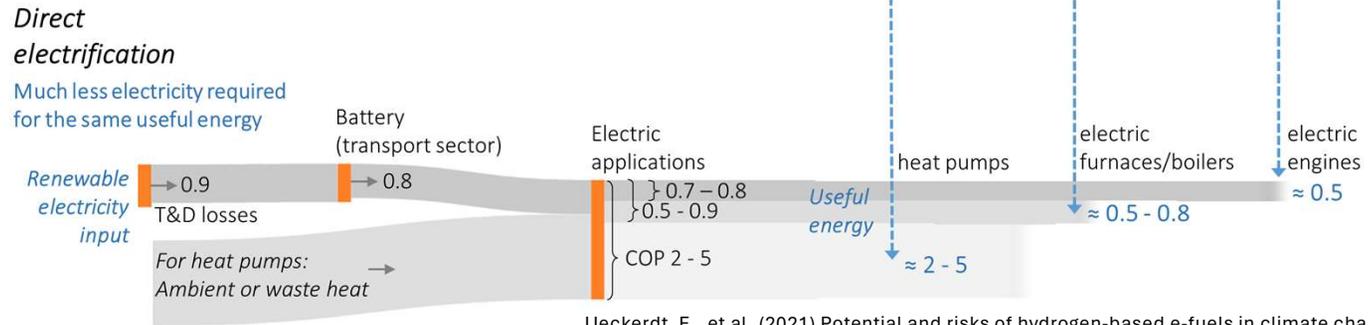
for different energy services and sectors

Low-temperature heat in industry and buildings, <100°C
High-temperature heat in industry, >100°C
Light-duty vehicles



Personenwagen:
ca. Faktor 5

Mit E-fuels wird 2-14 mal mehr Strom verbraucht als mit direkter Elektrifizierung

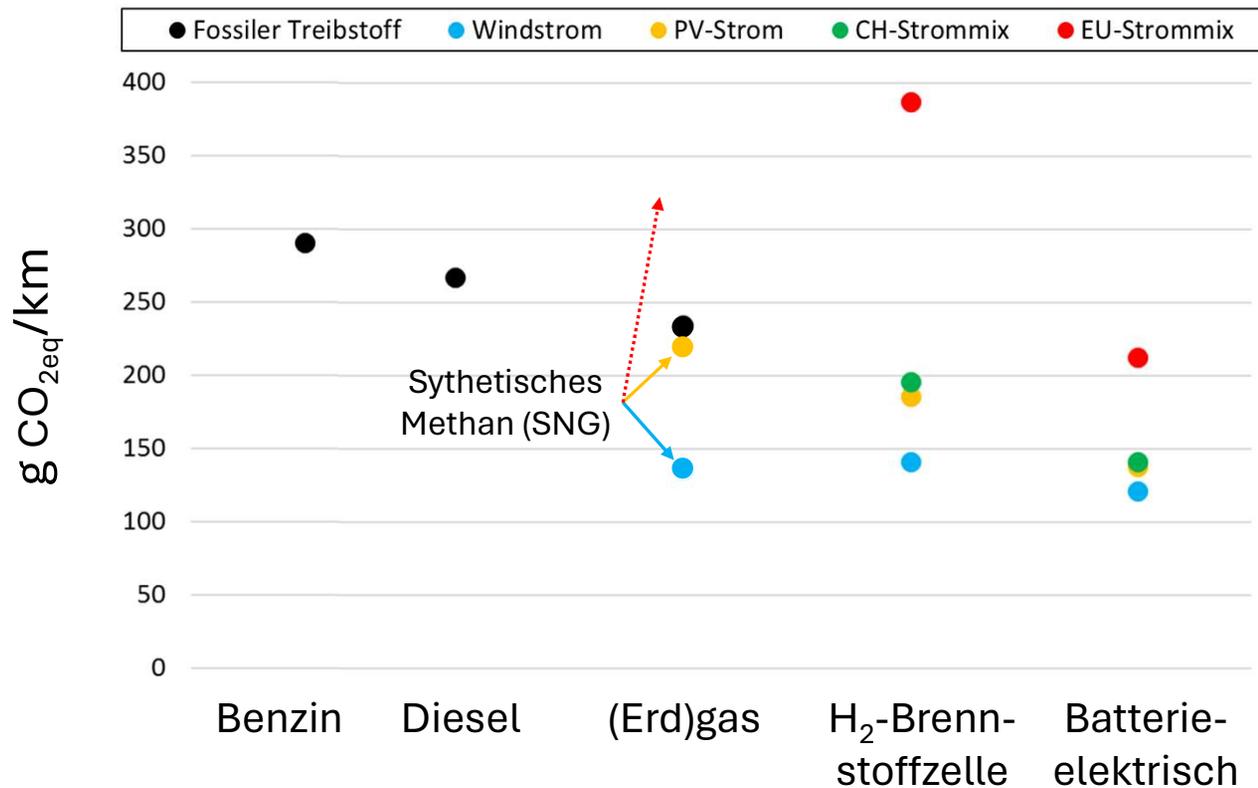


Ueckerdt, F., et al. (2021) Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation.

E-fuels

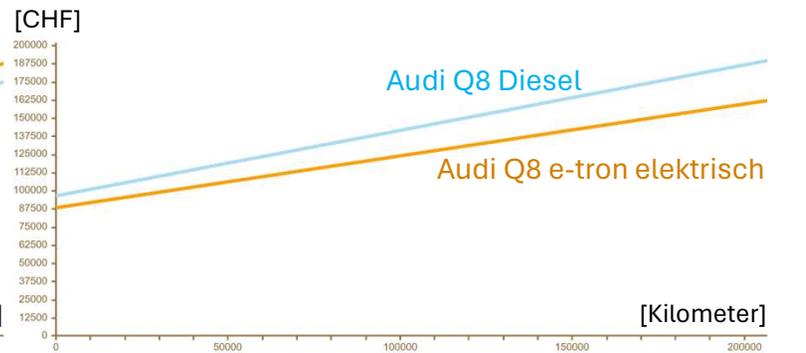
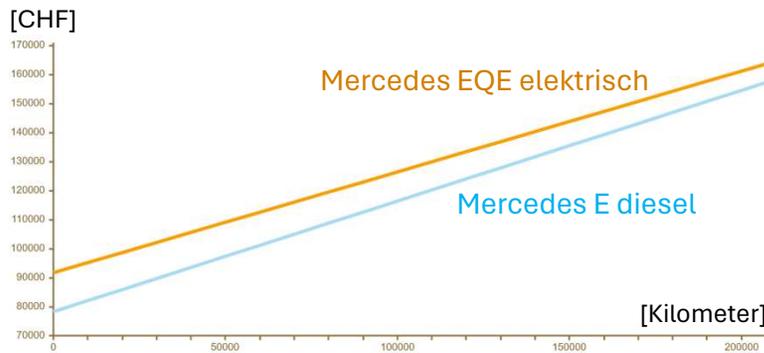
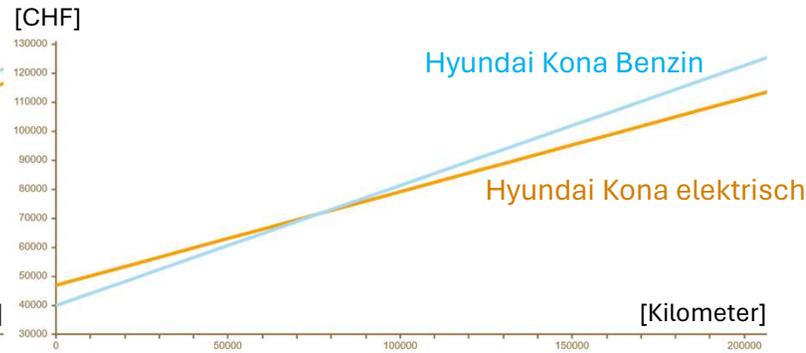
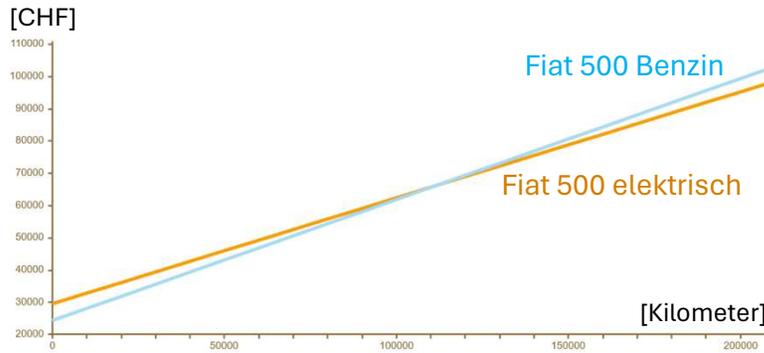
Direkte Nutzung
des Stroms

Treibhausgasemissionen: Bsp. Personenwagen



- **Batterieautos** nutzen den Strom am **effizientesten** → Reduktion der THG-Emissionen auch bei nicht 100% Strom aus Erneuerbaren
- Mit e-Fuels braucht es Strom mit sehr geringen THG-Emissionen für Klimanutzen
- H₂-Brennstoffzellenautos liegen zwischen Batterie- und E-Fuel-Fahrzeugen
- Auch **Batterieautos** erlauben **maximal 60-70% Reduktion der Treibhausgasemissionen**

Gesamtbetriebskosten Personenwagen



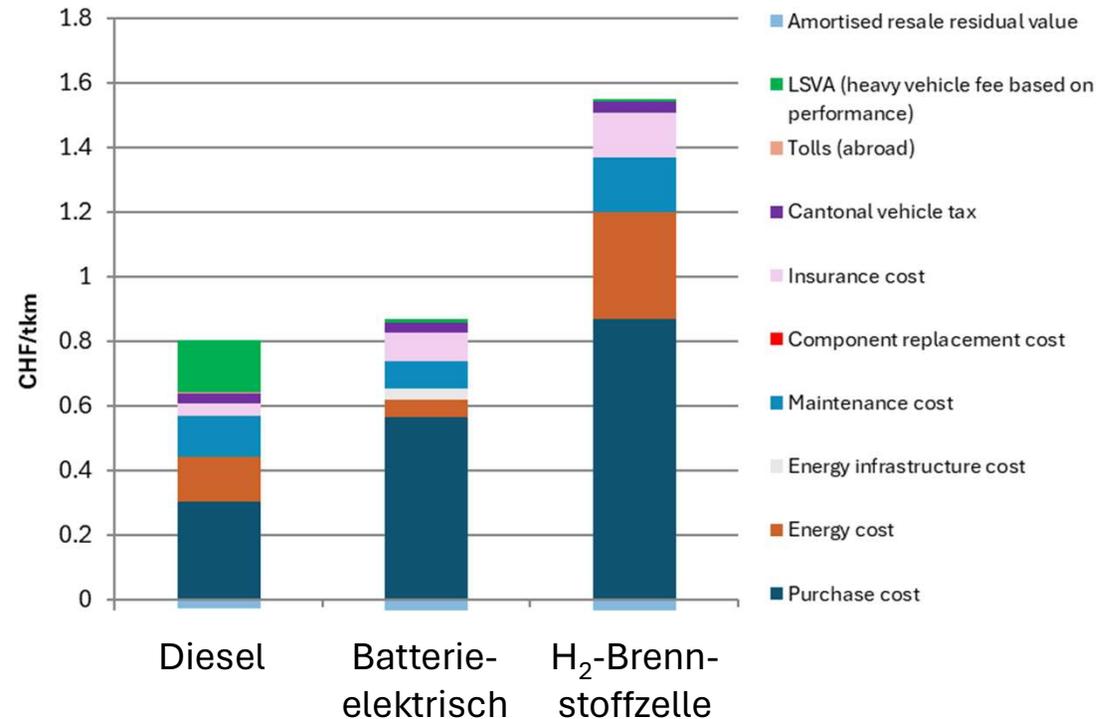
- Gesamtkosten elektrisch vs. Benzin/Diesel hängen stark vom Modell ab
- Meist sind BEV noch etwas teurer beim Kauf, aber günstiger nach 50-100'000 km
- Für BEV-Kosten ist wichtig, wo geladen wird und ob PV-Anlage vorhanden ist
- H₂ und e-fuels sind nicht verfügbar und prohibitiv teuer

Quelle: <https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/fahrzeug-kaufen-verkaufen/autosuche-vergleich.php>

Gesamtbetriebskosten Lastwagen



7.5 t LKW, 2025, ZH

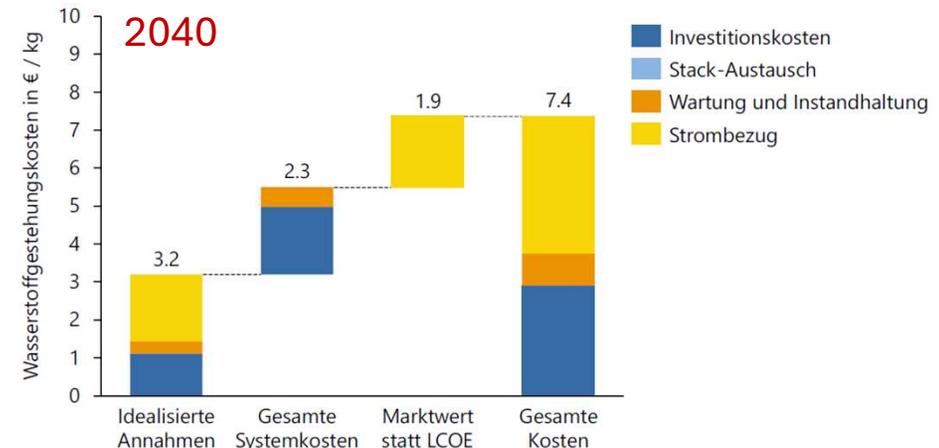
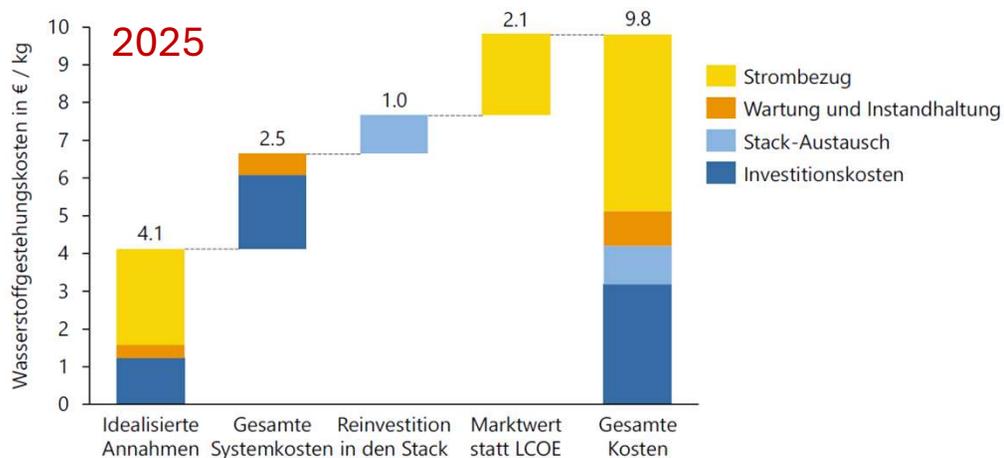


- Gesamtkosten des Gütertransports in der Schweiz sind stark abhängig vom LKW-Typ und dem Anwendungsfall
- Dank LSVA können batterieelektrische Lastwagen schon heute wettbewerbsfähig sein
- Wichtigste Faktoren:
 - ✓ Anschaffungskosten LKW
 - ✓ Stromkosten
 - ✓ Zukünftige Ausgestaltung der LSVA

Weiters generell wichtig:

- Ausbau der BEV-Ladeinfrastruktur
- Stabile regulatorischer Rahmen
- Reduktion der Anschaffungskosten von BEV/FCEV
- Ausweitung der Modellvielfalt bei BEV/FCEV

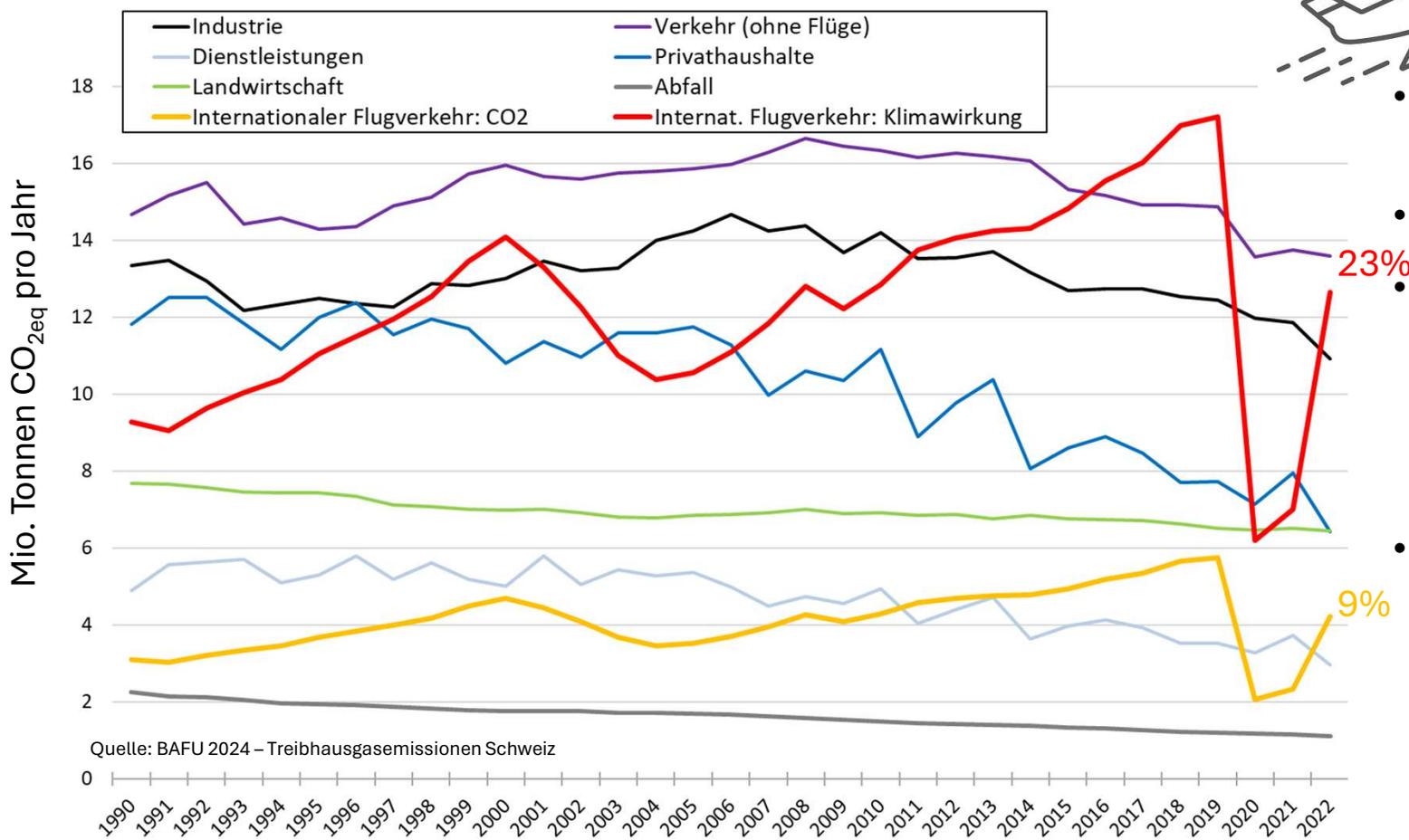
Kosten von grünem Wasserstoff (Beispiel Deutschland)



- Idealisierte Annahmen zu Kosten von grünem Wasserstoff (Wasserelektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren) unterschätzen die «echten» Kosten meist
- H₂-Kosten sind in der Realität oft mehr als doppelt so hoch als in idealisierten Rechnungen
- Ähnliches kann für H₂-basierte synthetische Treibstoffe (e-fuels) angenommen werden
- H₂ und e-fuels müssen importiert werden → Transportinfrastruktur nötig

Quelle: FfE (2025): Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht.

Flugverkehr: THG-Emissionen und Klimawirkung



- THG-Emissionen aller Sektoren sinken
- Ausnahme: Flugverkehr
- Gesamte Klimawirkung des Flugverkehrs ist etwa 3x so hoch wie die der CO₂-Emissionen alleine
- Grund:
 - “Nicht-CO₂-Effekte”
 - Kondensstreifen
 - Wolkenbildung
 - Feinstaub und NO_x

Batterieelektrischer Flugzeugantrieb?

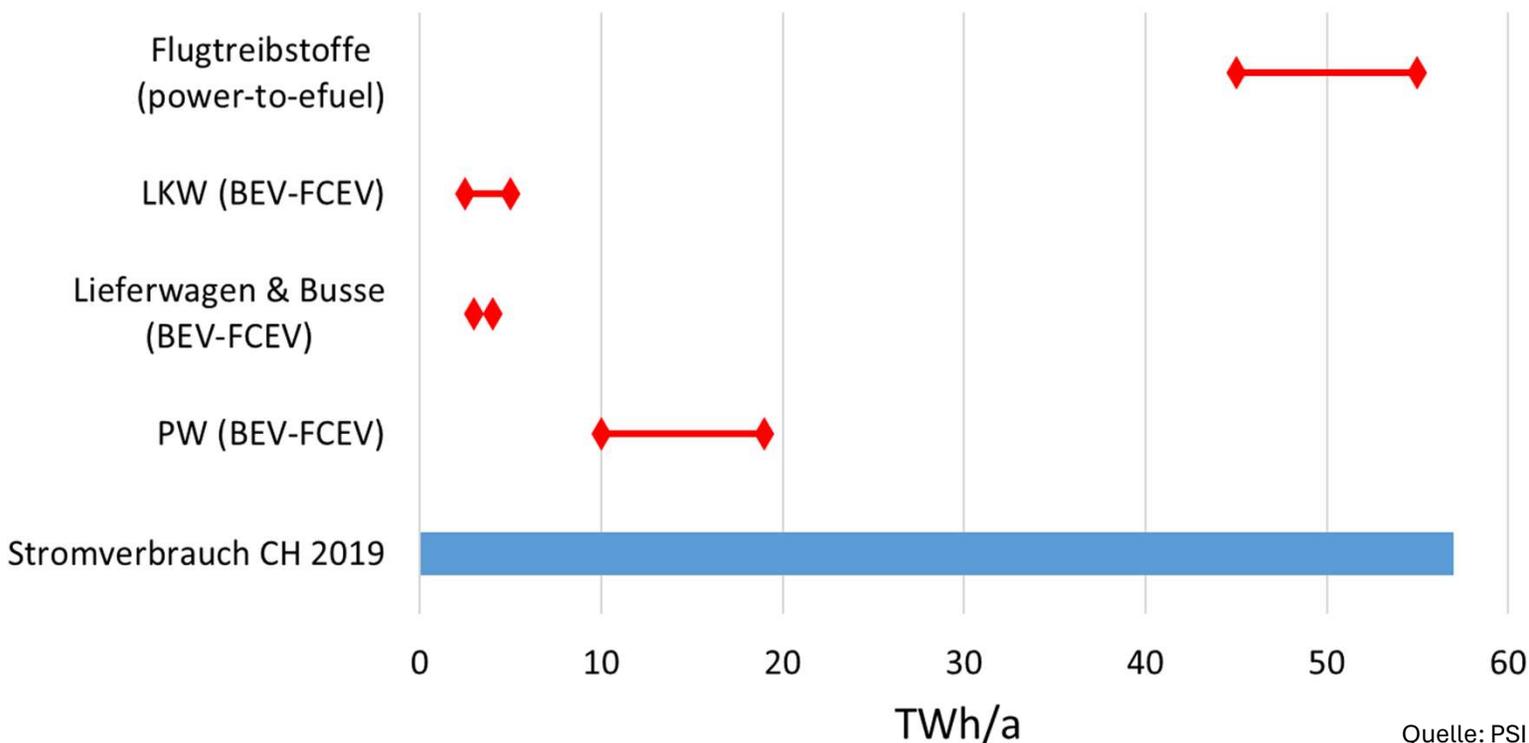


Electric Airbus A220 by Wikimedia Commons user "Michael Weimold" (collage by Beata Korozo) under CC BY 4.0

Was lässt sich gegen die Erwärmung durch Flugverkehr tun? PSI

- Flugzeuge effizienter machen 
- Weniger Fliegen 
- Treibstoffe nutzen, die keine (oder sehr geringe) CO₂-Emissionen verursachen
- Treibstoffe nutzen, welche die «Nicht-CO₂-Effekte» reduzieren
 - Nachhaltige Flugtreibstoffe / «Sustainable Aviation Fuels» (SAF) 
- Flugrouten so steuern, dass «Nicht-CO₂-Effekte» reduziert werden 
- CO₂ aus der Atmosphäre entfernen 
- Batterieelektrische und Wasserstoffantriebe entwickeln (Kurz- und Mittelstrecke) 

Zusätzlicher Strombedarf zur Elektrifizierung, Schweiz



- Nachhaltige Flugtreibstoffe müssen importiert werden
- Hoher Strombedarf verursacht negative Umweltauswirkungen:
 - Wasser- und Landverbrauch
 - Bedarf an kritischen Rohstoffen

PW: Personenwagen

LKW: Lastkraftwagen

BEV: Batterie-Fzg

FCEV: Brennstoffzellen-Fzg

Fazit



- Nachhaltige Personen- und Lastwagen fahren in Zukunft am besten batterieelektrisch
- Auch der öffentlicher Verkehr sollte zu 100% (batterie-)elektrisch angetrieben werden
- Voraussetzung: Elektrifizierung muss mit einem Ausbau der umweltfreundlichen, CO₂-armen Stromversorgung einhergehen
- Zusatznutzen: Bessere Luft, weniger Lärm, bessere Gesundheit
- Aber: Auch batterieelektrische Fahrzeuge mit Strom aus CO₂-armen Quellen reduzieren heute die THG-Emissionen nur um bis zu 60-70% → Reduktion des Verkehrs nötig
- «E-fuels» (Treibstoffe aus Strom, Wasser und CO₂) werden für Flugzeuge (Schiffe, Industrie) gebraucht
- Flugverkehr: braucht eine Kombination aus nachhaltigen Treibstoffen und weniger Fliegen
- Nachhaltiger Verkehr braucht generell eine stabile Regulierung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

Kontakt:

christian.bauer@psi.ch

<https://www.psi.ch/de/ta>

Informationsquellen und online tools:

calculator: <https://calculator.psi.ch/>

energieschweiz: <https://www.verbrauchskatalog.ch/>