



Die Klimawirkung von H₂

Andrea Lübcke

Kern-Aussagen

- Wasserstoff ist essenziell, um den Industriestandort Deutschland (und die Welt) zu defossilisieren und klimafreundlich aufzustellen. Der Aufbau einer globalen Wasserstoffwirtschaft muss zielstrebig umgesetzt werden.
- Wasserstoff hat eine indirekte Klimawirkung
- Die Größe des Effektes hängt von den Emissionen (Verluste) ab.
- Sowohl das Treibhauspotential als auch der Wasserstoffzyklus (Quellen und Senken) sind nur ungenau bekannt.
- Worst-case Szenario für 2050 → $\Delta T \sim +0,1$ K
- Es ergeben sich FuE Bedarfe u. a. zur Quantifizierung und Reduzierung von H₂-Emissionen.

Baustein zur Defossilisierung

THG-Einsparpotenziale



Ersatz von Erdgas in
Verbrennungsprozessen:

7 kg CO₂ / kg H₂



Einsatz in
Brennstoffzellenfahrzeugen

14 kg CO₂ / kg H₂

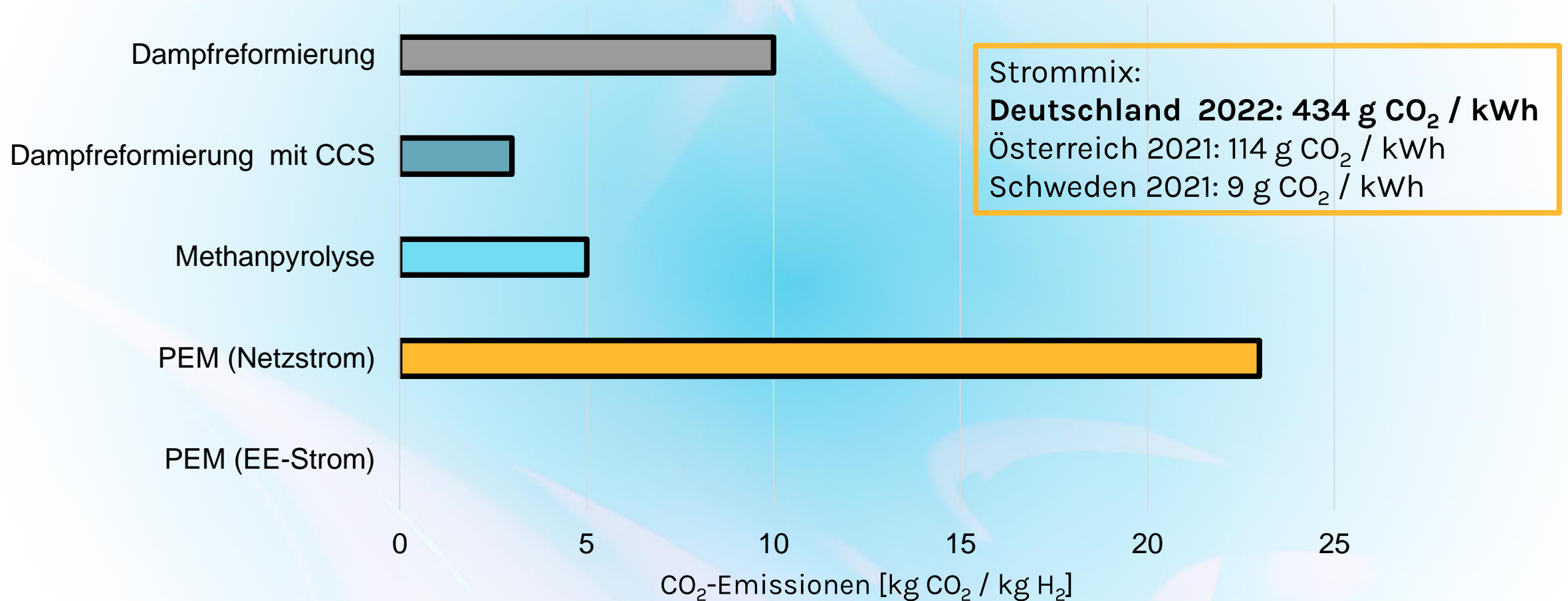


Stofflicher Einsatz in der
Eisendirektreduktion:

26 kg CO₂ / kg H₂

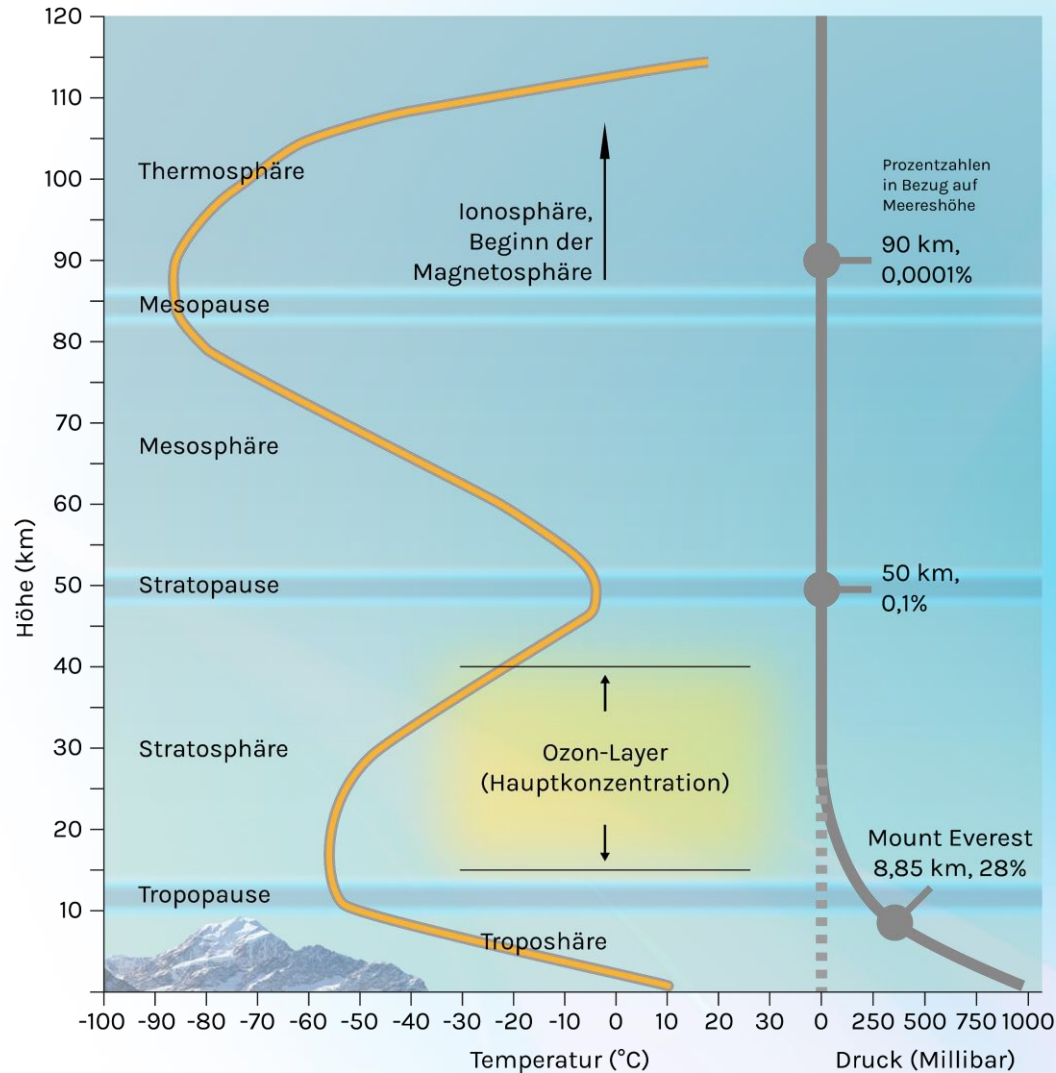
H₂: saubere Lösung?

... kommt drauf an

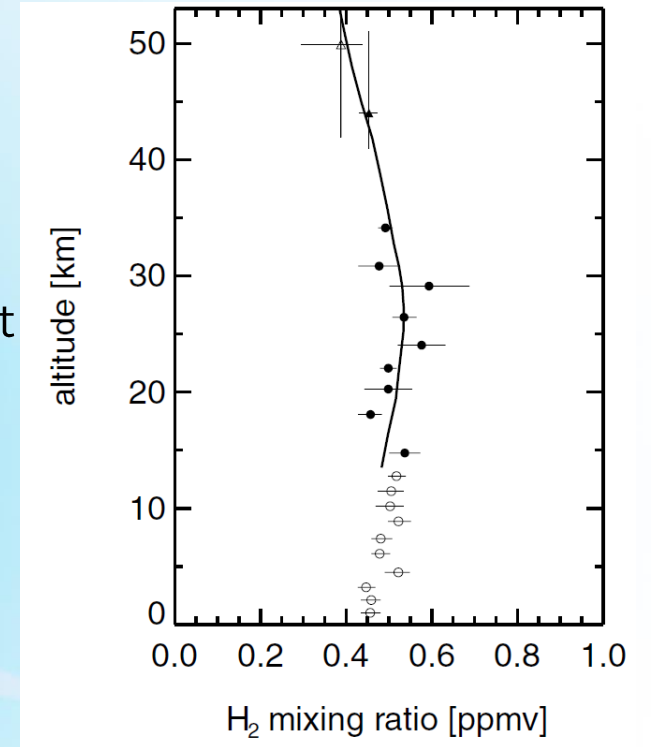


H₂ als (indirektes) Treibhausgas

Die Atmosphäre



- Troposphäre
 - Oberflächennächster Teil der Atmosphäre
 - Hier findet „Wetter“ und „Klima“ statt
 - Durch großräumige Vertikalbewegungen und Turbulenzen gut gemischt
- Stratosphäre
 - Schicht oberhalb der Troposphäre
 - Hier befindet sich die Ozonschicht
 - Sehr trocken (=wenig Wasserdampf)



Ehhalt & Rohrer, Tellus B: Chem. Phys. Meteorology, 61:3, 500 (2009)

H₂ als (indirektes) Treibhausgas



- Reaktion kann sowohl in der Troposphäre als auch in der Stratosphäre ablaufen

Troposphäre

- „Verbrauch von OH“-Radikalen
 - Längere Lebensdauer von Methan
 - Ca. 50% der Klimawirkung
- Erzeugung von atomarem Wasserstoff
 - Vorstufe von Ozon
 - Ca. 20% der Klimawirkung

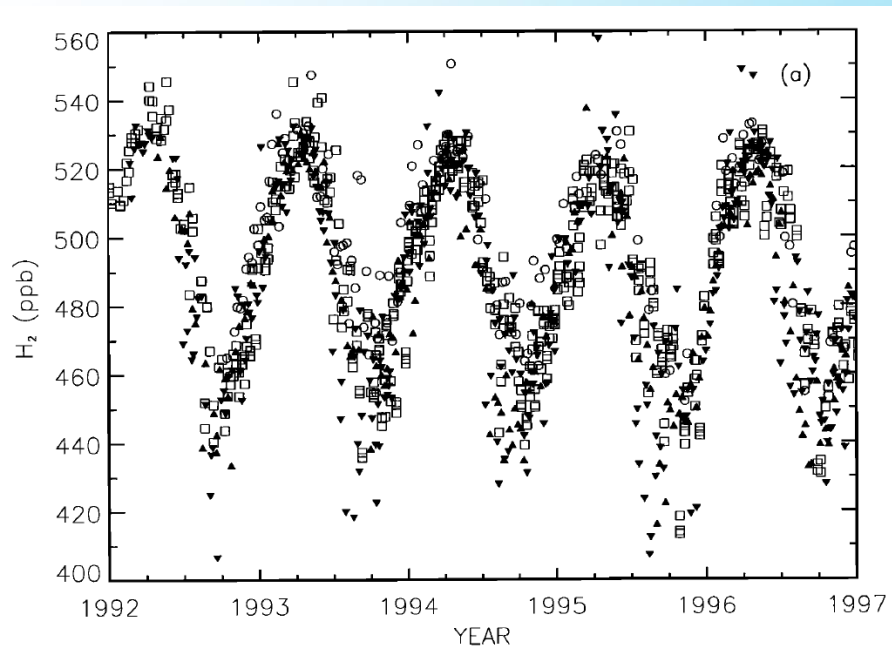
Stratosphäre

- Stratosphärischer Wasserdampf
- Relativ neu in der wissenschaftlichen Diskussion
- Ca. 30% der Klimawirkung

Variation d. H₂-Konzentration

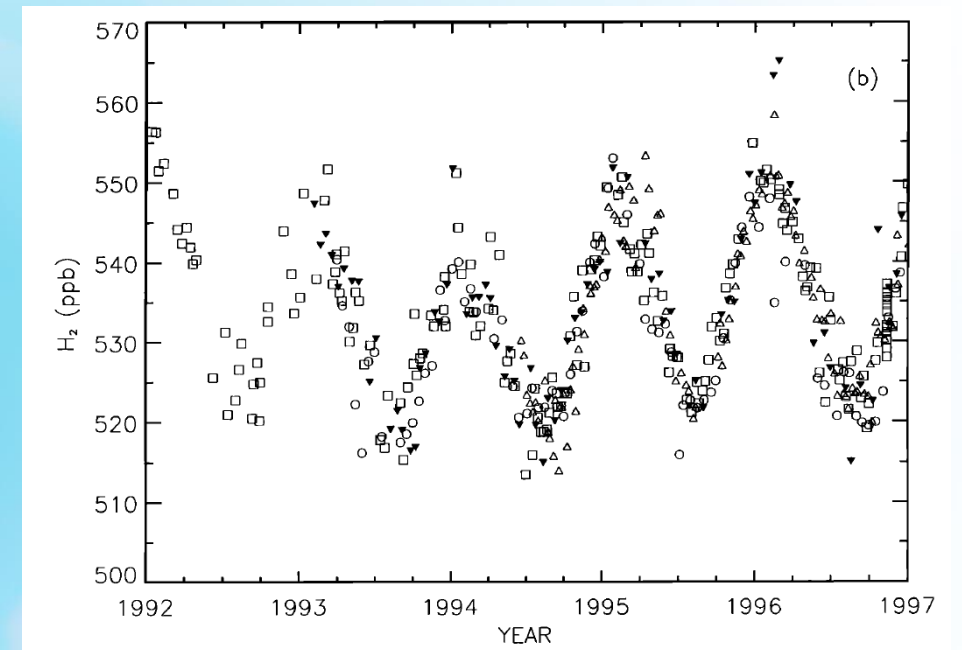
Jahreszeitliche und geografische Abhängigkeiten

Nord-Halbkugel



- Jahreszeitliches Max: ~530 ppb (~März)
- Jahreszeitliches Min: ~450 ppb (~ Sep.)

Süd-Halbkugel



- Jahreszeitliches Max: ~550 ppb (~Jan./Feb.)
- Jahreszeitliches Min: ~520 ppb (~ Jul. / Aug.)

Der Wasserstoff-Zyklus

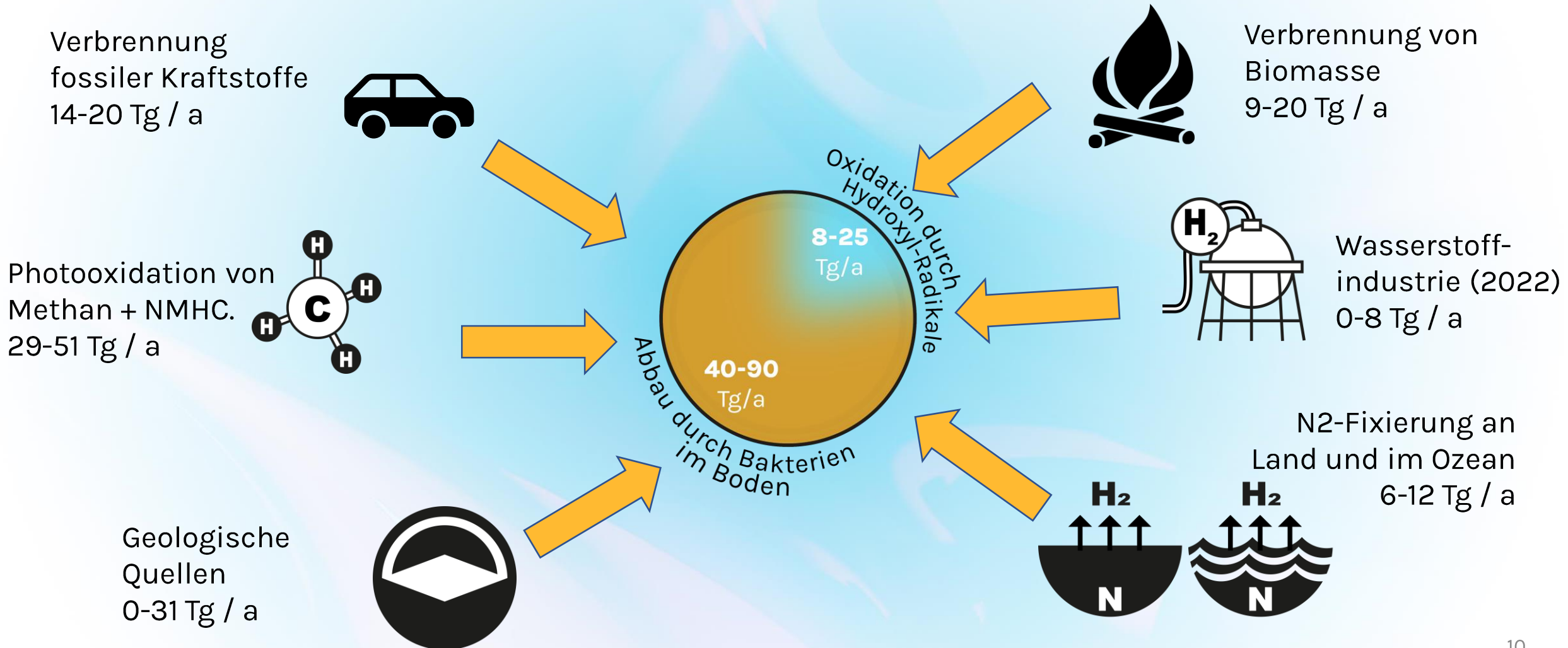
- Geografische Variationen, jahreszeitliche Schwankungen sowie die Phasendifferenz dieser Schwankungen zwischen Nord- und Südhalbkugel zeigen:
 - Boden ist wichtige Senke von atmosphärischen Wasserstoff
 - Für ca. 75% der Senkleistung verantwortlich
- Weitere wichtige Senke: Oxidation durch OH-Radikale in der Atmosphäre
 - Für ca. 25% der Senkleistung verantwortlich



- Diese Reaktion ist die Ursache für die Klimawirkung von Wasserstoff

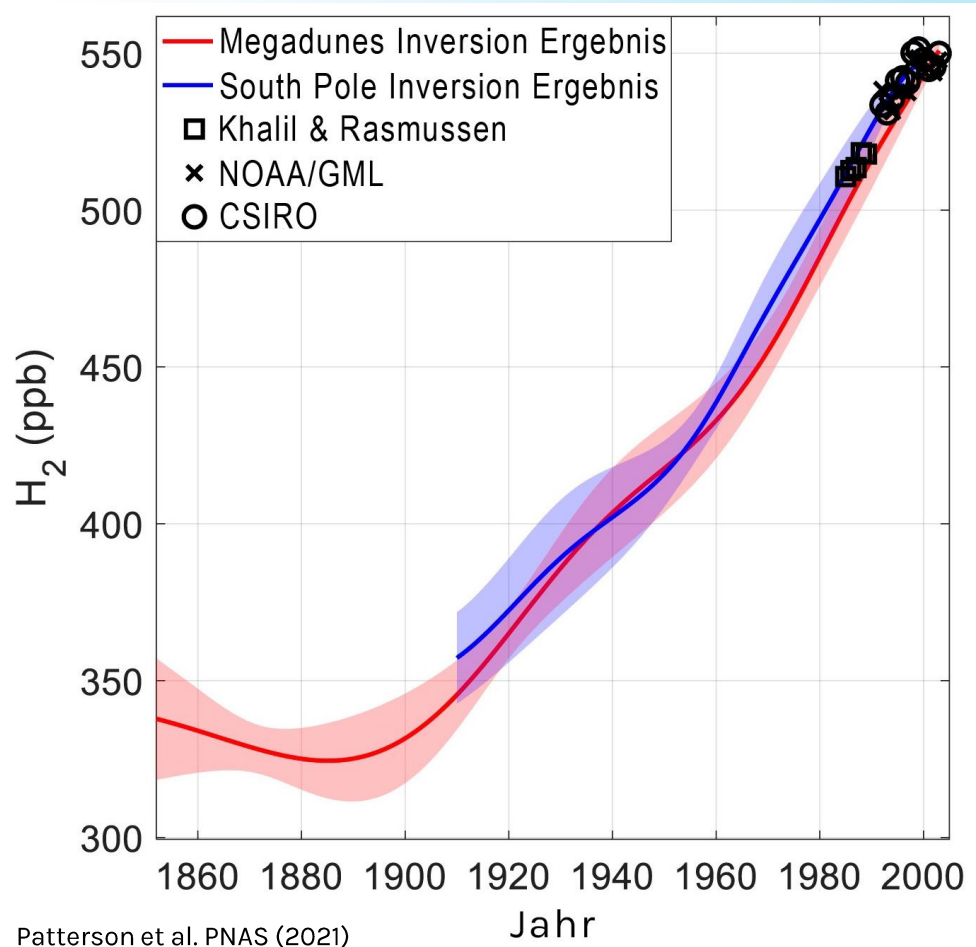
Der Wasserstoff-Zyklus

180 Tg H₂ in der Atmosphäre; Lebensdauer: 2,5 a



Historische Entwicklung

Anstieg um 70% in den vergangenen 150 Jahren



- Firneismessungen in der Antarktis
- Inversion der Tiefenabhängigkeit der Wasserstoffkonzentration → Zeitabhängigkeit
- Bis 1890 → ca 330 ppb
- Seit 1900 → Anstieg auf ca 550 ppb
- Anstieg durch Zunahme anthropogener H₂ Emissionen und Photooxidation von CH₄.
- Abknicken um die Jahrtausendwende → strengere Abgasregelungen; mehr Katalysatoren in KFZ im Einsatz
- Emissionen aus KFZ >80% der anthropogenen H₂ Emissionen

Klimawirkung einer H₂-Wirtschaft

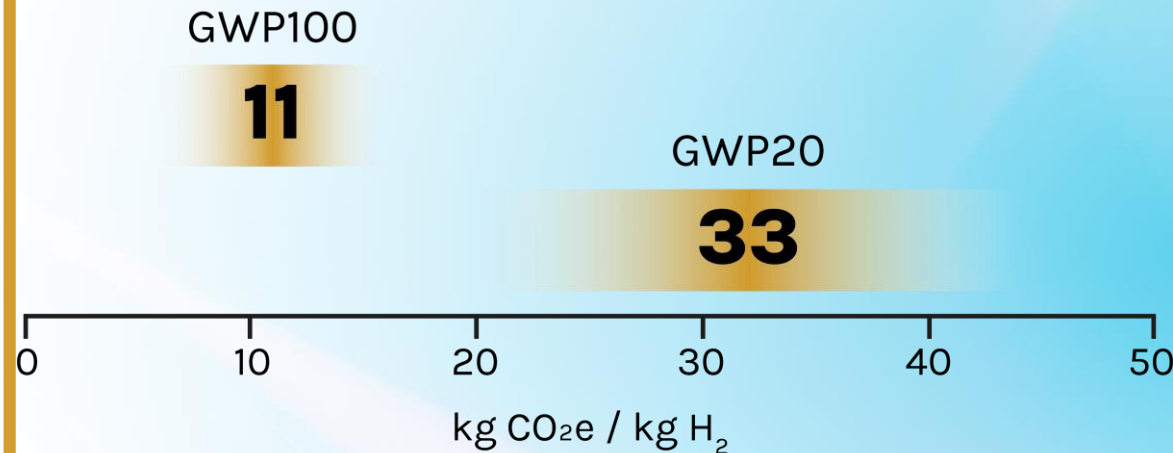
Abhängig von:

- Dem Treibhauspotential von Wasserstoff
- Der Wasserstoffmenge in der Atmosphäre
- Erzeugungstechnologien (z. B. Methanemissionen, die bei der Produktion von blauen Wasserstoff entstehen)
- Der Menge der ersetzten fossilen Emissionen
- Entwicklung von Methanemissionen (Permafrostböden, Landwirtschaft)

Treibhauspotential

GWP20 und GWP100

N. Warwick et al., Atmospheric implications of increased hydrogen use, BEIS Research Paper (2022)



➤ Unsicherheiten sind relativ groß:

➤ $GWP20 = 33^{+11}_{-13}$

➤ $GWP100 = 11+/-5$

- Für gepulste Wasserstoffemission (Bei kontinuierlicher Emission sind die Werte etwas größer)
- GWP20 (Global Warming Potential) beschreibt das Treibhauspotential eines Stoffes relativ zum Treibhauspotential von CO₂ gleicher Masse über 20 Jahre; GWP100 analog über 100 Jahre
- H₂ hat über 20 Jahre also eine ca. 33 mal so hohe Treibhauswirkung wie CO₂; über 100 Jahren noch eine 11 mal so hohe Wirkung

Wasserstoffemissionen

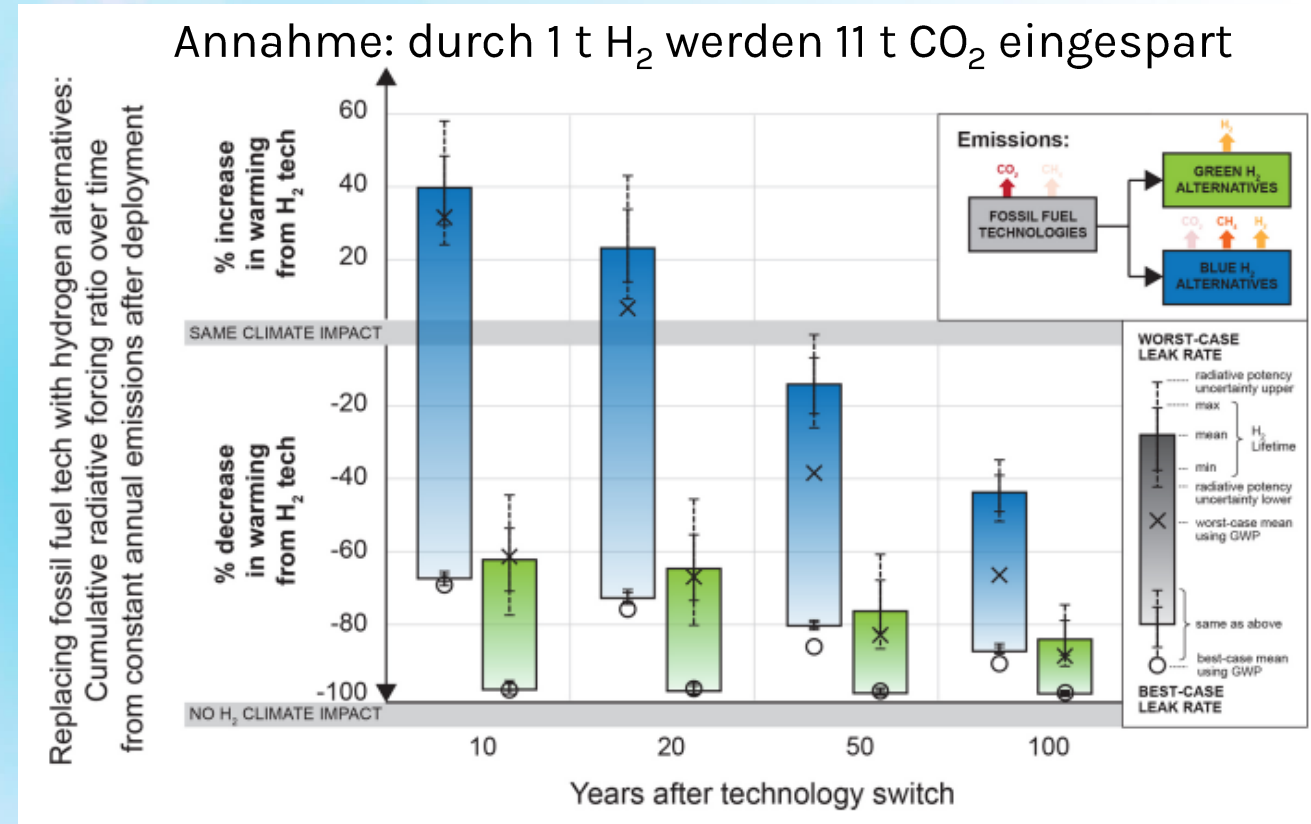
- Globale, jährliche Wasserstoff-Bedarfe:
 - Aktuell: ca 100 Tg → ca. 4000 TWh
 - Für 2050: (500...1000) Tg → ca. (20...40) PWh
 - Zur Deckung des gesamten, heutigen Energiebedarfs: 4000 Tg → 160 PWh
- Verlustraten
 - Weitestgehend unklar
 - Szenarien: 1%...10% (entlang der **gesamten** Wertschöpfungskette)
- Zum Vergleich: Gesamtquellstärke 2022: 60-140 Tg/a

Annahme:
800 Tg (3,2 PWh)

Quelle H₂-Wirtschaft:
(8...80) Tg

Klimawirkung von H₂-Emissionen

- Szenario 1 (1% Verluste entlang der Wertschöpfungskette)
 - pro kg H₂ entweichen 10 g H₂ (entspricht ~330 g CO₂-Äquivalente (GWP20))
 - Von den theoretisch 11 kg eingesparten CO₂-Emissionen bleiben 330 g CO₂-Äq übrig (3%)
- Szenario 2 (10% Verluste entlang der Wertschöpfungskette)
 - Pro kg H₂ entweichen 100 g H₂ (entspricht 3,3 kg CO₂-Äquivalente (GWP20))
 - Von den theoretisch 11 kg eingesparten CO₂-Emissionen bleiben 3,3 kg CO₂-Äq übrig (30%)
- Bei blauem Wasserstoff entstehen zusätzlich zu Wasserstoffemissionen auch Methanemissionen



Ocko & Hamburg, Atmos. Chem. Phys., 22, 9349–9368, (2022)

THG-Einsparpotenziale

Klimawirkung umso positiver, je mehr CO₂ mit der Anwendung eingespart wird

Ersatz von Erdgas für die Gebäudewärme

7

Ersatz fossiler Antriebe durch Brennstoffzellenantriebe

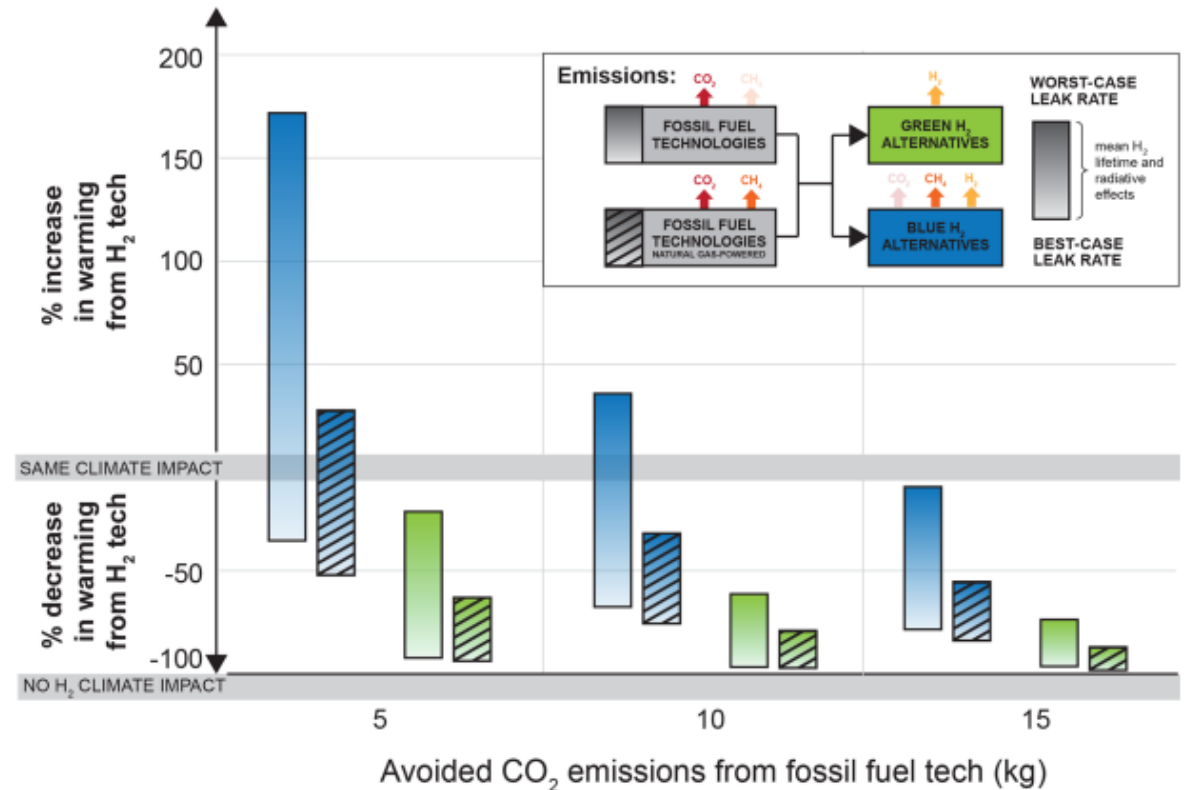
14

Ersatz der Hochhofenroute durch Eisendirektreduktion in der Stahlherstellung

26

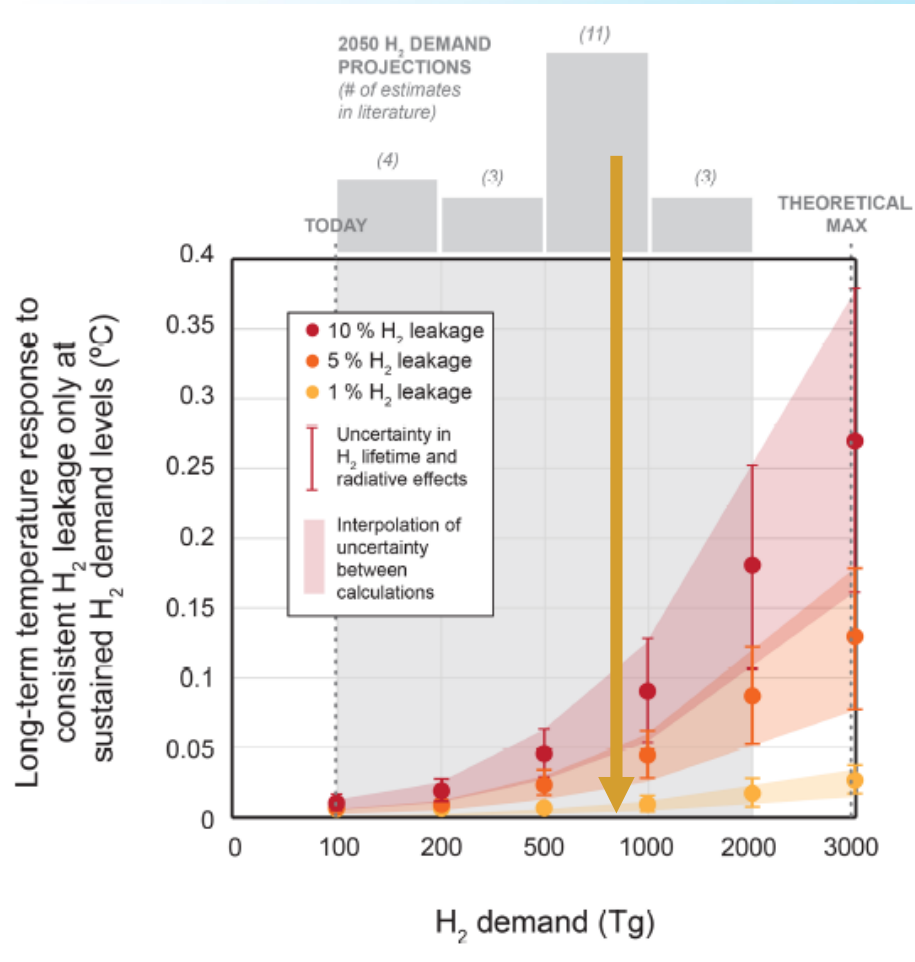
kg CO₂ / kg H₂

Replacing fossil fuel tech with hydrogen alternatives:
Cumulative radiative forcing ratio **over 20 years**
from constant annual emissions after deployment



Ocko & Hamburg, Atmos. Chem. Phys., 22, 9349–9368, (2022)

Langfristige Auswirkungen



- Für globalen Jahresbedarf von 800 Tg H₂, 10% Verlusten & Treibhauspotentialen am oberen Ende der Unsicherheit → $\Delta T \sim 0,1K$
- Deutlich kleinere Temperaturänderungen für geringere Verluste
- Temperaturerhöhung entspricht
 - der vermiedenen Erwärmung durch alle kosteneffizienten Methoden im kommenden Jahrzehnt, um Methanemissionen zu vermeiden
 - der vermiedenen Erwärmung durch den Ausstieg aus der Nutzung von fluorierten Kohlenwasserstoffen
 - Der Erwärmung durch die globale Schiff- und Luftfahrt ohne Klimaschutzmaßnahmen bis 2100.

Ocko & Hamburg, Atmos. Chem. Phys., 22, 9349–9368, (2022)

Notwendige Maßnahmen

- Genaues Verständnis des H₂-Zyklus
- Genaues Verständnis der H₂-Klimawirkung
- Quantifizierung von Wasserstoffverlusten entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Wie stark weichen H₂-Emissionen unter realen Bedingungen von denen unter Laborbedingungen ab? (Faktor „Mensch“)
- Entwicklung dafür notwendiger Messtechnik
- Entwicklung und Optimierung von Methoden, um Wasserstoffemissionen zu vermeiden; ggf, anschließende Wasserstoffrückgewinnung
- Material- und Technologieentwicklung, um Wasserstoffverluste zu minimieren



Vielen Dank

**Kontakt:
luebcke@acatech.de**