Wasserstoff 2045: Visionen für eine klimaneutrale Energiezukunft

Prof. em. Dr.-Ing. D. Stolten, Prof. Dr. J. Linßen

16. Göttinger Energietagung: Das H2-Puzzle / Wie die Teile richtig setzen?

Göttingen, den 14.05.2025

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Ziele einer Wasserstoffstrategie in Deutschland bis 2045

Der Auftrag:

- Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung gemäß Klimaschutzgesetz
  - auf der Basis erneuerbarer Energien
  - Wasserstoff als Kettenglied, wenn große Energiemengen gespeichert oder verwendet werden sollen
    - Rückverstromung
    - Verkehr
    - Industrie
- Beitrag zur Kostenreduktion des Energiesystems
- Beitrag zur Resilienz des Energiesystems
- Zweiter Energieträger im Verkehr
- Grüne Produkte, insbesondere in der Chemie- und Stahlindustrie

Studienergebnisse für 2045:

- Ein EE-Energergiesystem ist flächenmäßig gut darstellbar
- Es ist wirtschaftlich darstellbar
- Deutschland ist infrastrukturell dafür gut aufgestellt
- Der Strompreis sinkt wieder

- Es sind neue Regularien, wirtschaftliche Modelle nötig
- Planbarkeit über Legislaturperioden hinaus ist wesentlich für Investitionen
- **Die Zeitachse ist das größte Problem**

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Erforderliche Aktivitäten zur Zielerreichung 2045

- **Verlässliches, langfristiges politisches Bekenntnis zur Treibhausgasneutralität 2045**
- Technische Regeln, Normen, **Vorschiften und Gesetze**
- Investitionen erfordern klare Ausrichtung der politischen Vorgaben über Legislaturperioden hinaus
- Marktmodelle für Strom, Wasserstoff, Rückverstromung und Elektrolyseurbetrieb
- **Neue Geschäftsmodelle**
- **Einbeziehung der Bürger, Markt- und Geschäftsmodelle mit reduziertem bürokratischen Aufwand gegenüber Ausschreibungen**
- Komponentenentwicklung weiter führen
- F&E insbesondere zur Kostensenkung und Ressourcenfrage
- Energieversorgung auch strategisch absichern gegen Terrorismus, kriegerische Aktivitäten
- **Energieversorgung muss bezahlbar bleiben**

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Zeitachse zur Erreichung der bilanziellen Treibhausgasneutralität 2045

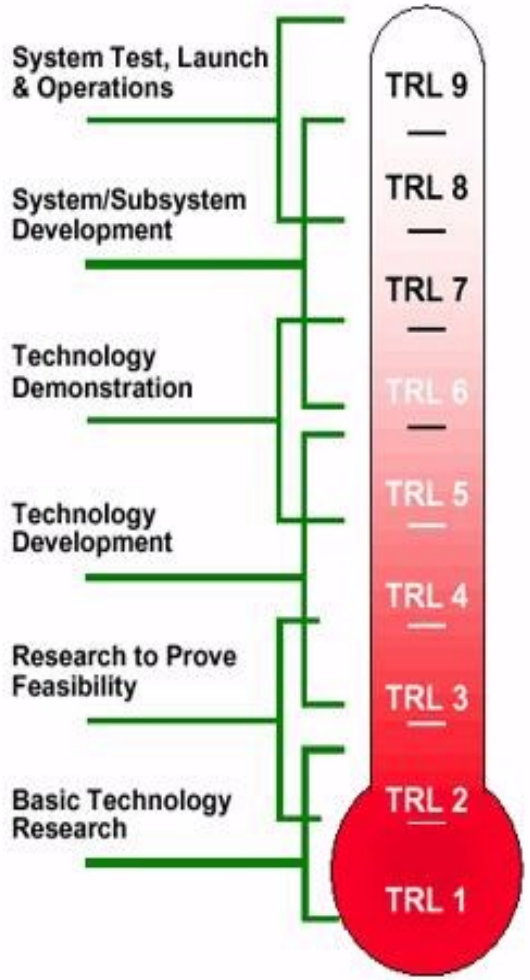
- **2045:** 100% CO2eq Reduktion komplett erreicht
- **2035:** Start Marktdurchdringung
- **2025:** Markteinführung

Entwicklungsperiode Gen1: bis 2025

Forschungsperiode Gen1 : bis 2020

Aufgabe der Forschung

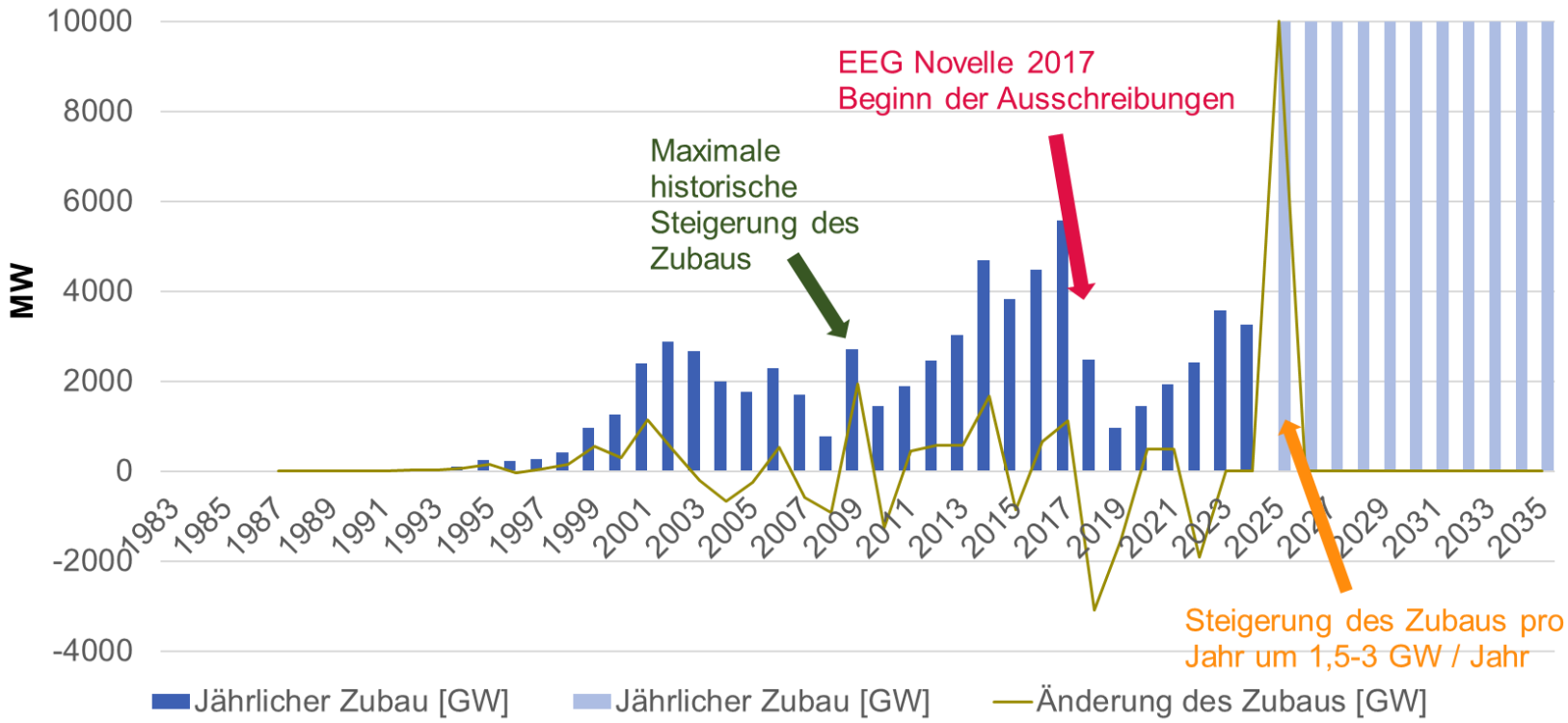
- Erforschung neuer Techniken für post-2045
- **Forschung an existenten Grundtechniken zum Schließen der Wertschöpfungskette**
  - Kostensenkung, Lebensdauerverlängerung
  - Kritische Ressourcen
  - Recycling
  - Kreislaufwirtschaft



ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

On-shore Windenergiezubau in Deutschland

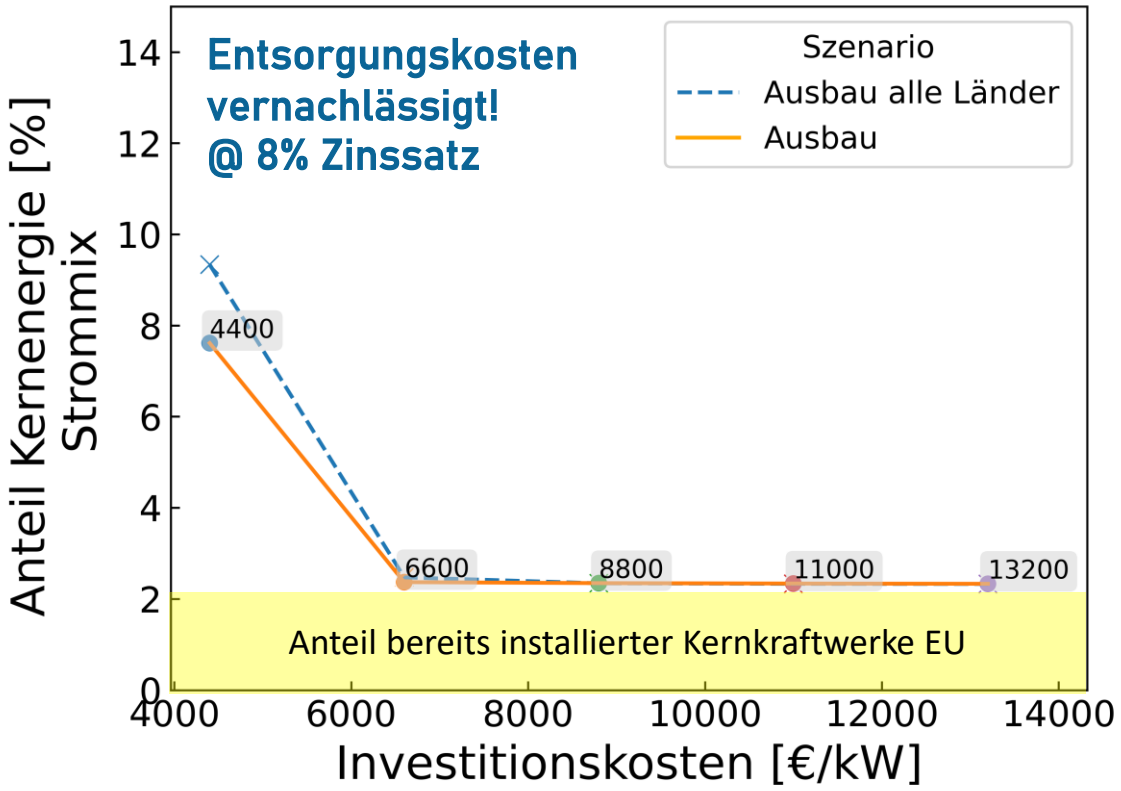


- Die EEG Novelle 2017 hat den Erfolgspfad der deutschen Windenergie durch Ausschreibungen beendet.
- Die Begründung waren Übererzeugung im Norden und die „Kapitalanlage des Zahnarztes“, so die Presse damals
- **Infrastrukturkosten betragen ca. 15 % der Gesamtkosten des Energiesystems**
- Die Infrastruktur muss daher den EE-Zielen folgen, diese ermöglichen.
- Redispatch als bequemes Provisorium verhindert Innovation
- Netzausbau, auch mit HGÜ, Wasserelektrolyse und Abregelung können das Problem lösen

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Kernenergie ab 6600 €/kW Investitionskosten wettbewerbsfähig



Hinkley Point C:
- 17.500 €/kW

Flamanville-3:
- 10.875 €/kW

Olkiluoto:
- 6.875 €/kW

IEA:
- 6.300 €/kW (2022)
- 4.300 €/kW (2050)

www.go.fzj.de/EU_NetZero

- Bau neuer Kernkraftwerke nicht wettbewerbsfähig gegenüber Wind und Photovoltaik
- Maximal 8-10% der Stromproduktion bei etwa 40% der Kosten
- Statusvergleich: 2023 weltweit 9,15% der Stromerzeugung; www.worlsnuclearreport.org Statusreport 2024

Energietransformation, der deutsche Sonderweg?

92,5% der weltweiten 2024 zugebauten Kraftwerkskapazität war erneuerbar*

Die Energietransformation ist kein deutscher Sonderweg

Erneuerbare Energie ist konkurrenzfähig geworden und sollen Kohle, Öl und Erdgas sowie kleine Mengen Kernenergie (9,15% der Stromerzeugung 2023 weltweit) ersetzen.

Wasserstoff ist komplementär zu Strom:
Speicherung wegen Fluktuation
Resilienz des Energiesystems wird höher
Gasförmiger Energieträger für hohe Temperaturen und als Reduktionsmittel (Stahl)
Gasförmiges Reduktionsmittel
Edukt für die Chemische Industrie zusammen mit CO_2, PtChem
Edukt für PtF

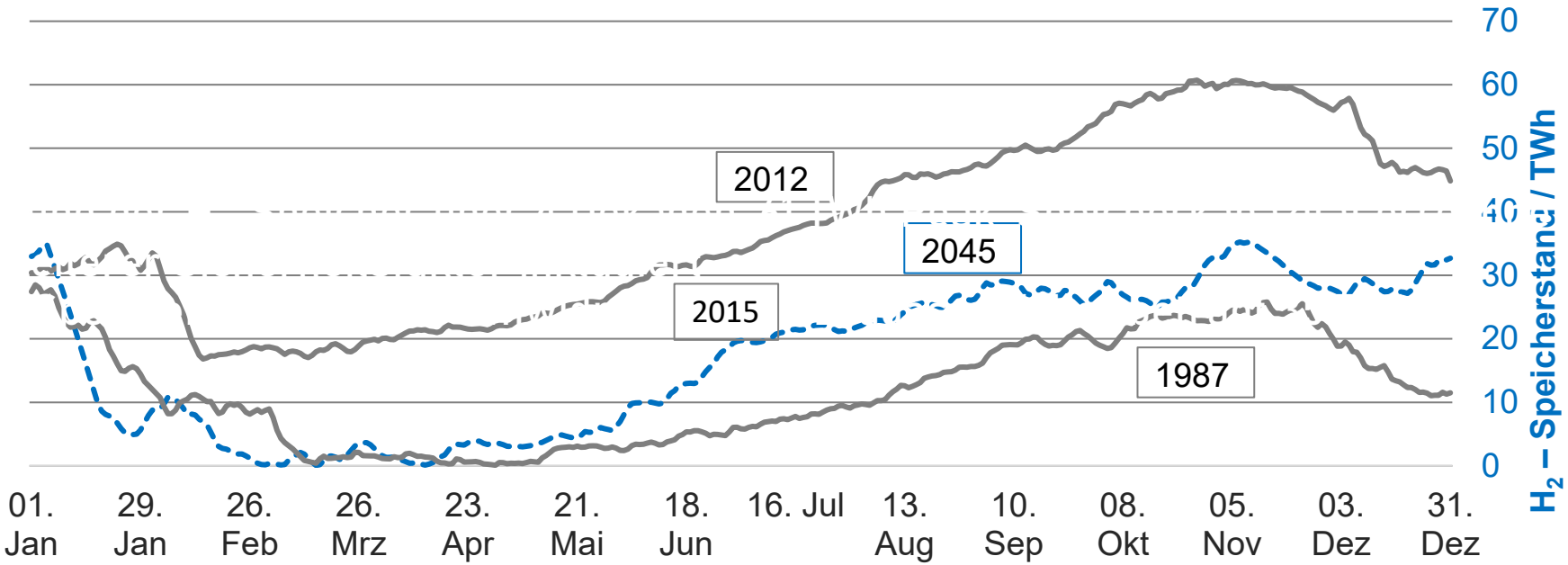
CH_4, synthetisches Biogas ist problematischer wegen Schlupfes bei hohem Klimafaktor von ca 30.

* ttps://www.irena.org/News/pressreleases/2025/Mar/Record-Breaking-Annual-Growth-in-Renewable-Power-Capacity, last accessed 25_05_09

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

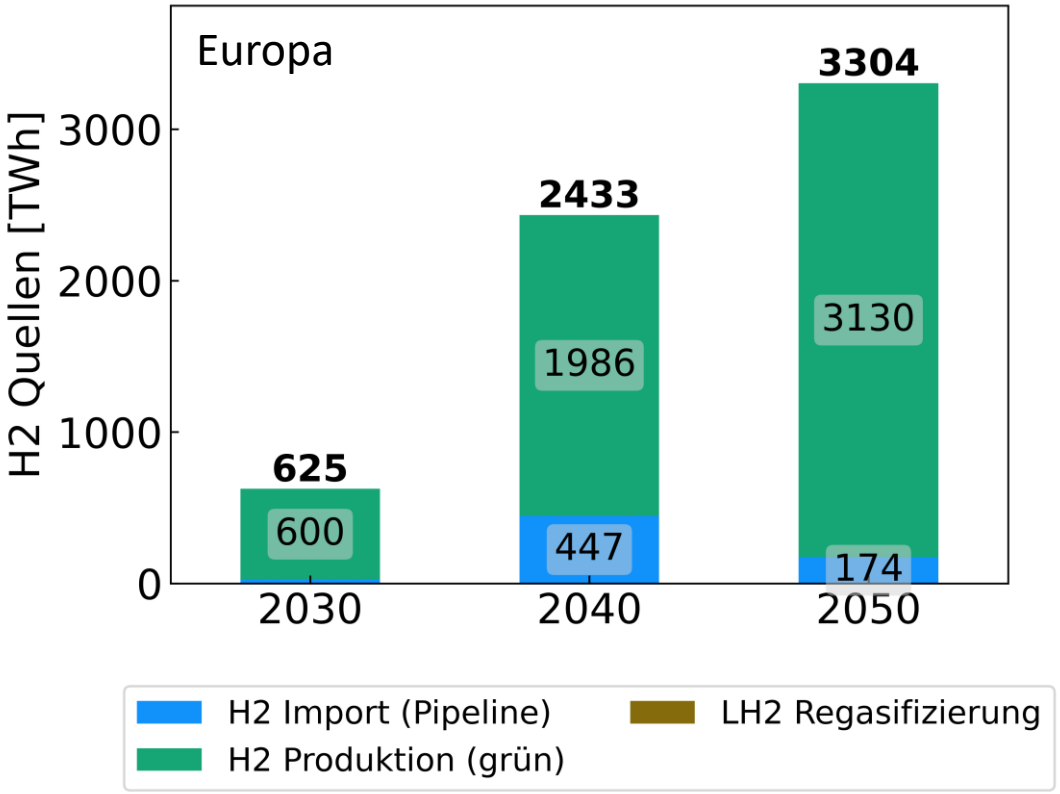
Langzeitspeicher für Wasserstoff ausgelegt über 37 Wetterjahre

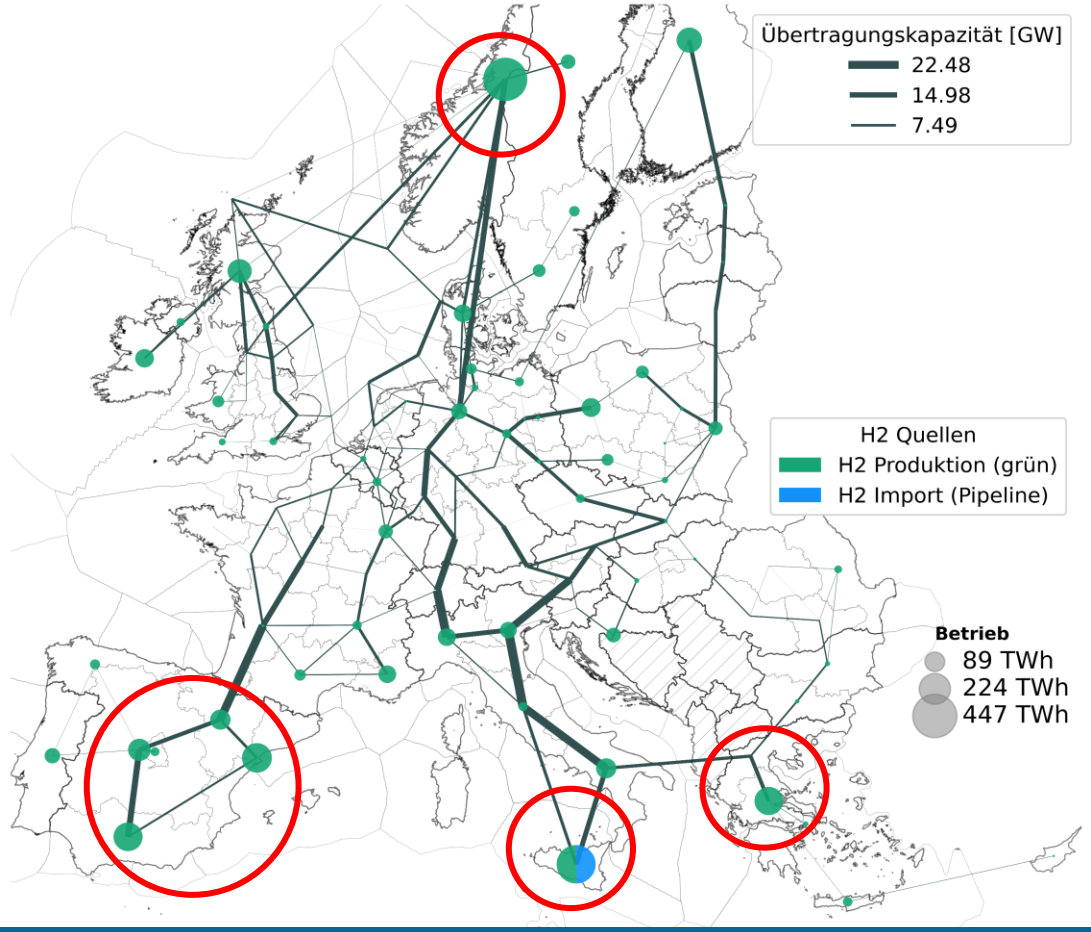


- Derzeitige Salzspeicher ausreichend, wenn etwa 50% Biogas verwendet wird 35 TWh Wasserstoff
- Doppelte Speicherkapazität nötig, wenn nur Wasserstoff verwendet wird; 60 TWh
- Im europäischen Szenario reicht die vorhandene Speicherkapazität für 2 Wo Dunkelflaute

- Ökologische Folgen eines Speicherausbaues untersuchen, für dezidierte Speicher ohne Salzverwertung
- Beschleunigter Kavernenausbau, umweltmäßig, technisch, wirtschaftlich, rechtlich → untersuchen
- Umwidmungs- und Ausbauplanung weiter verfolgen
- Möglichst mehrere alternative Geschäftsmodelle für Rückverstromung, Elektrolyse und Speicherung
- Gesamtsystemforschung im europäischen Kontext

Wasserstoffversorgung Mitteleuropas durch Süd- und Nordeuropa gestützt





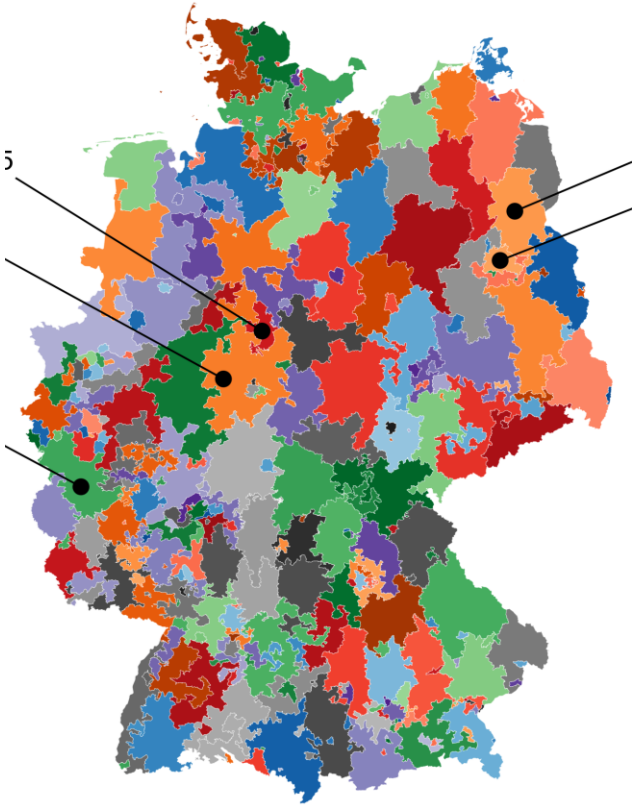
- *Wenn Ausbauraten erreichbar:* Europäische Wasserstoffversorgung wird innereuropäisch und damit verlässlich
- Norwegen, Spanien, Italien und Griechenland werden größte Wasserstofflieferanten
- Deutschland wird größter Wasserstoffimporteur mit 77 % Importquote, 550 TWh
- Keine internationalen Importe per Schiff, dadurch aber auch kein internationaler Preisdruck

Wasserstoff kann zelluläres, resilientes Stromsystem ermöglichen

Resilienz gegen
- Naturkatastrophen
- Klimawandel
- Terror, hybride Kriegsführung und Krieg

Resilienz des Energiesystems durch zonal autarke Bereiche
350 Zonen führen zu 52% Mehrkosten.
Geringere Zonenzahl führt zu realistischen Zusatzkosten

Weg:
- Ein starkes Wasserstoffnetz
- Rückverstromungsmöglichkeiten in Städten
- EE-Überbau in ländlichen Gebieten



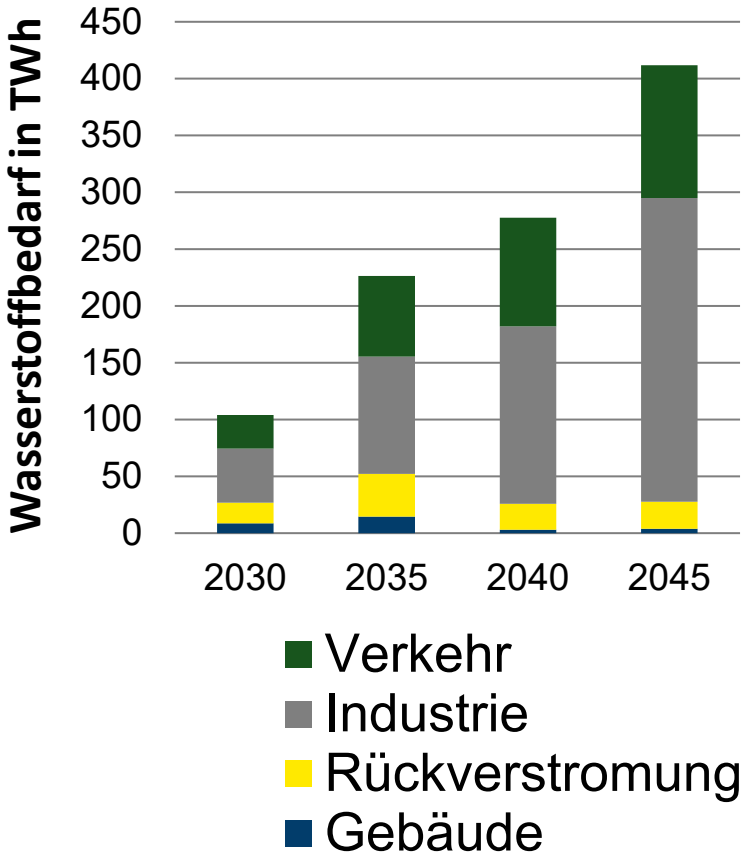
► Systemforschung, Simulation
► Regelungstechnik einschließlich Hardwarekomponenten

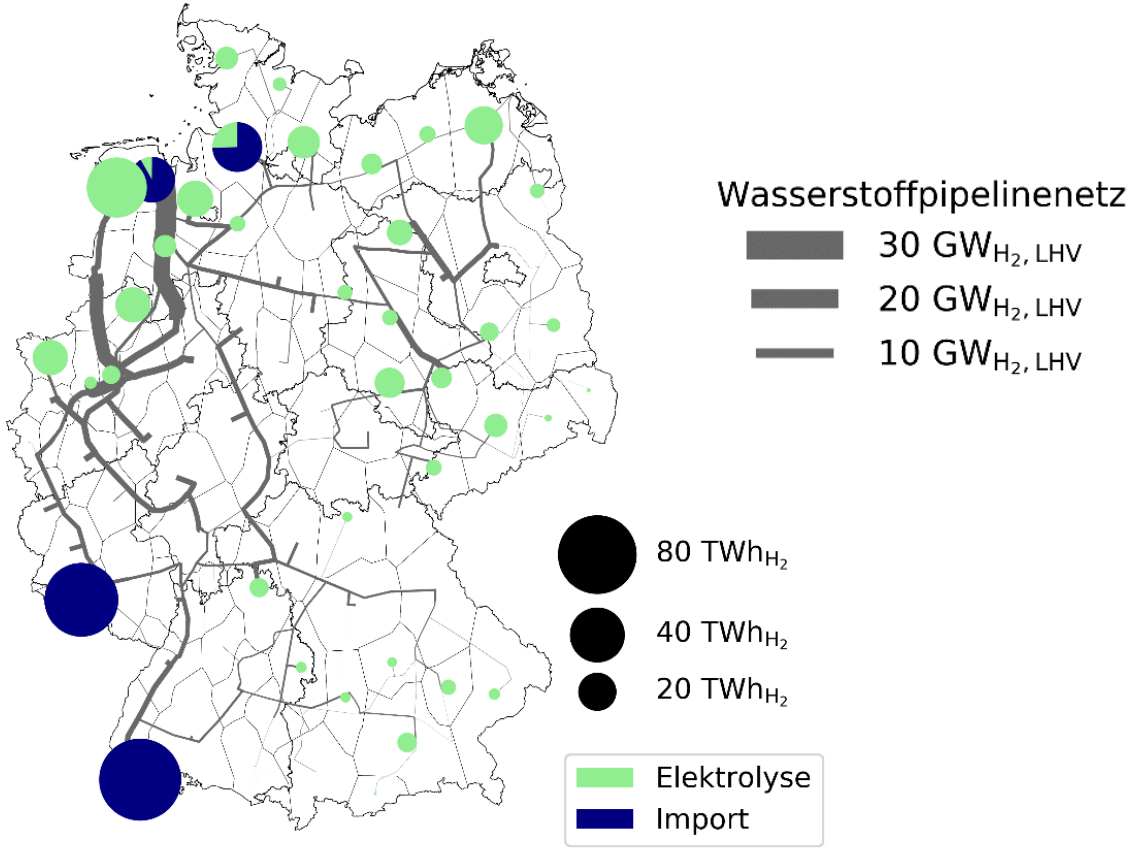
Quelle: Risch, Stanley, Dissertation „Techno-ökonomisches Potenzial dezentraler und autarker Energiesysteme, RWTH, 2024

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Optimierte H_2-Infrastruktur in Deutschland 2045



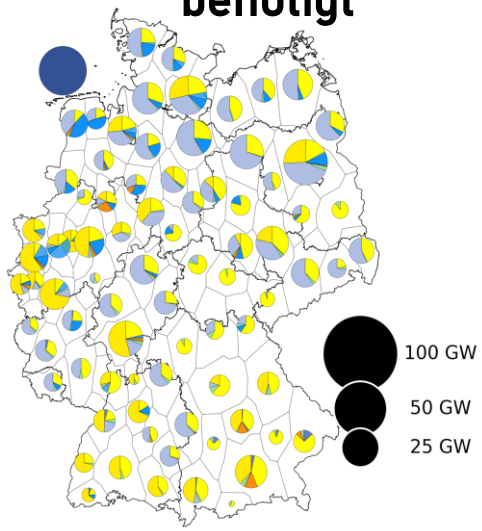


- Salzkavernenumrüstung jetzt beginnen
- Pipelines zeitnah quantitativ umwidmen

- Dynamische Pipelinemodellierung unter variabler Last mit Lastumkehr

Wasserstoffimporte reduzieren Ausbaunotwendigkeit substanziell

mit Wasserstoffimport
60% des EE-Ausbaupotentials benötigt

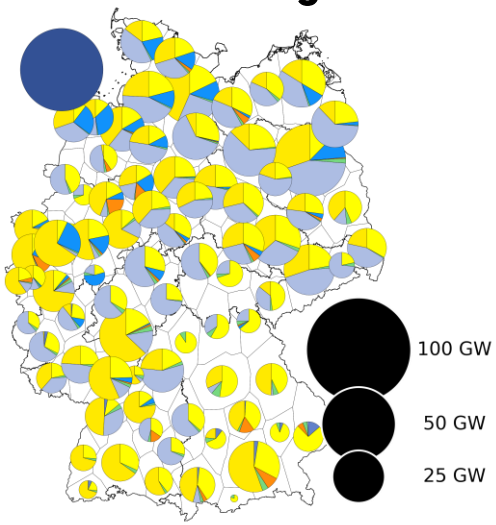


2045

Kapazitätszubau:

+ 115% Aufdach-PV
+ 55% Wind Offshore
+ 25% Wind Onshore

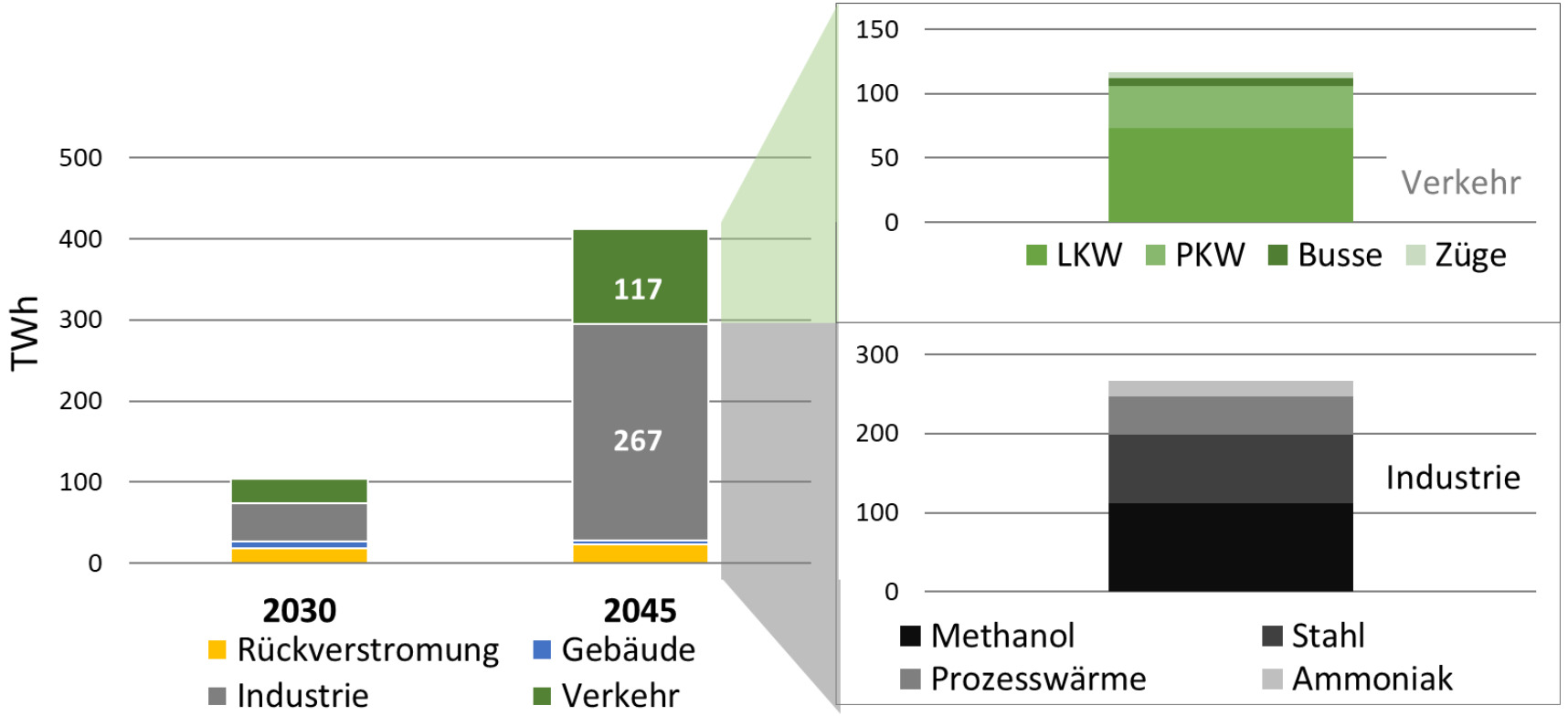
ohne Wasserstoffimport
80% des EE-Ausbaupotentials benötigt



Wasserstoffimporte
- ► erlauben geringere EE-Ausbaugrade
- ► reduzieren die Gesamtkosten
- ► verbessern Akzeptanz
- ► Importe per Pipeline billiger als per Schiff aber LH2 ist per se hochrein

► Schiffstransport von LH2

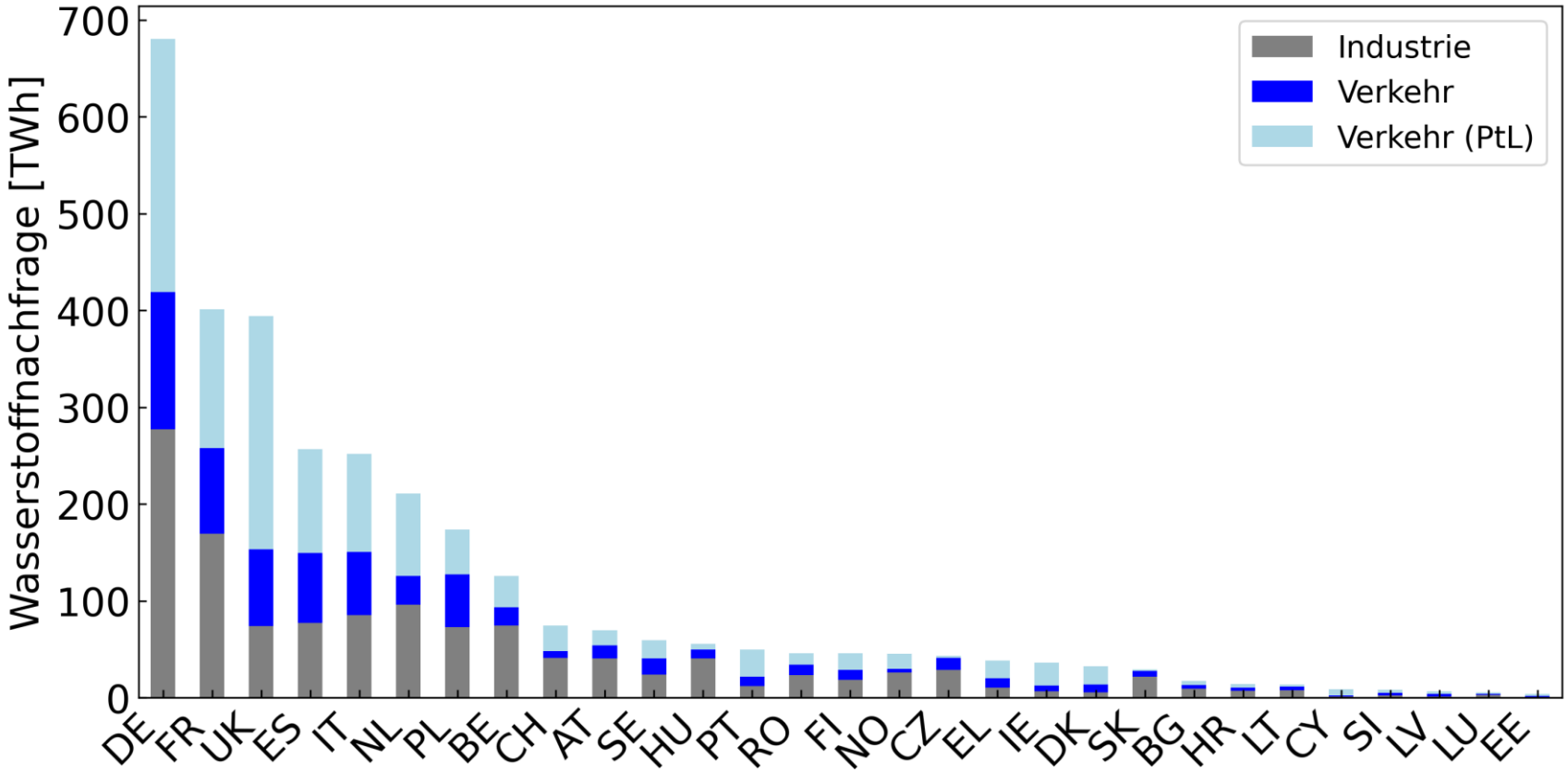
Wasserstoffbedarf im Szenario KSG 2045



- Etwa 70% des zukünftigen Wasserstoffbedarfs entfällt auf die Industrie
- Wasserstoffeinsatz in Gebäuden spielt nur eine geringe Rolle
- Neben Strom ist ein weiterer Kraftstoff strategisch erforderlich für die Resilienz

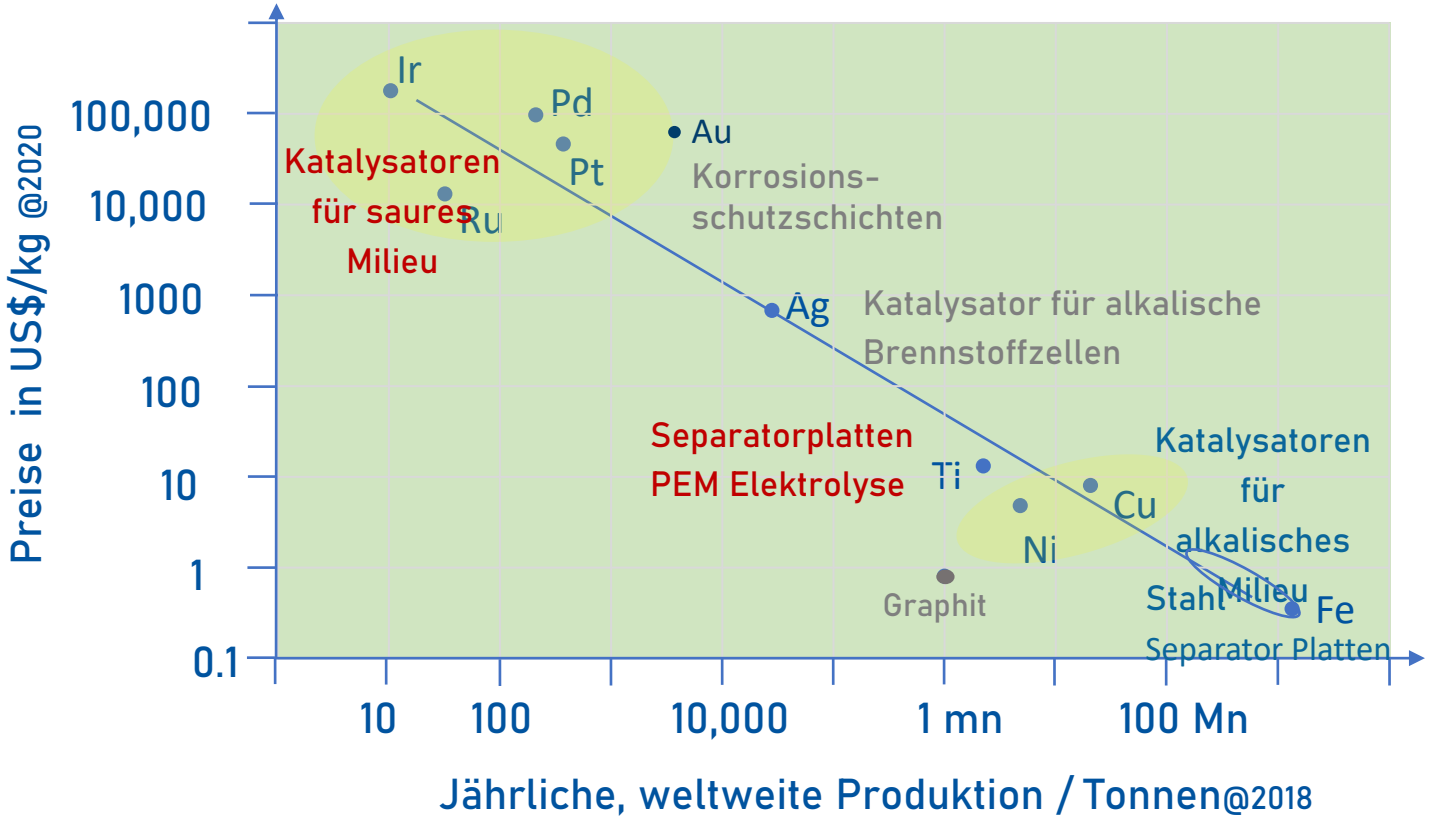
- Wasserstoff als Kraftstoff weiter verfolgen
- Wasserstoff für den Flugbetrieb
- Power to Chem

Hohe Wasserstoffnachfrage durch Synthetische Kraftstoffe in 2050



- Hohe H2-Nachfrage durch Ineffizienz des Herstellungspfades flüssiger Kraftstoffe
- Kapazitätsaufbau als Übergangstechnologie fraglich
- Wasserstoffdirekteinsatz soweit möglich sinnvoll, allerdings zunächst teurer und mit schwacher Infrastruktur
- Bio-basierte Kraftstoffe vorübergehend

Materialien für alkalische Elektrolyse sind Dekaden preiswerter und sicher verfügbar



- Materialkosten und Materialverfügbarkeit sprechen für alkalische Elektrolyse
- Forschung zu alkalischer Elektrolyse; zero gap, Widerstandsverringerung, aktivierte Elektroden
- Analog: Na-Ionen Batterien

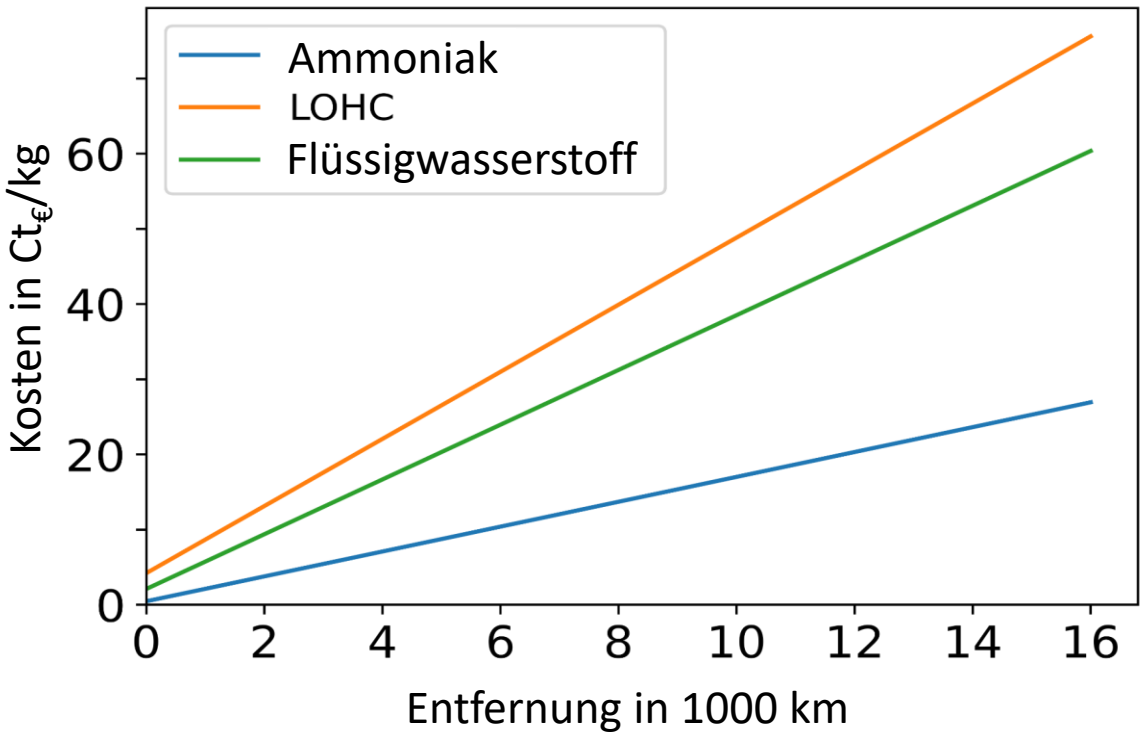
Sources:
Quantities from: Brown TJ, Idoine NE, Wrighton CE, Raycraft ER, Hobbs SF, Shaw RA, et al. WORLD MINERAL PRODUCTION 2014–18; British Geological Survey 2020
Prices taken from different sources as of end of 2020; extreme peaks shaved

ENERGY Transition CONSULTING

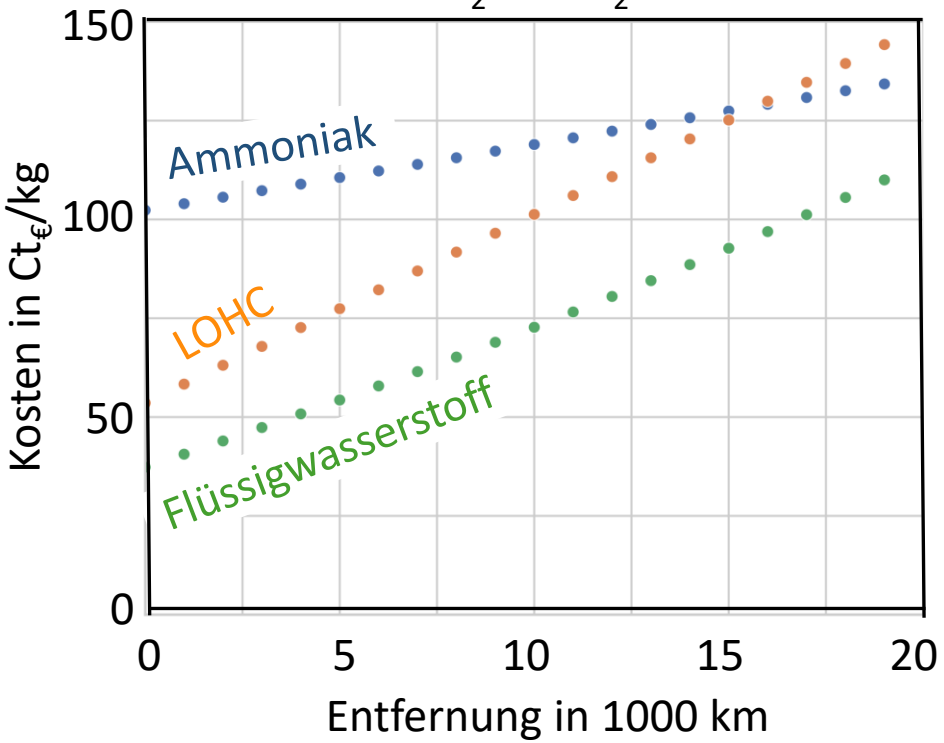
JÜLICH Forschungszentrum

Flüssigwasserstoff ist am günstigsten zu transportieren

Reine Transportkosten



Transport- und Umwandlungskosten
GH_2 zu GH_2



- Die Kostenkette von GH2 zu GH2 muss betrachtet werden, nicht die direkten Transportkosten
- Ammoniak ist für die Markteinführung sinnvoll und bis zu einem Maße, in dem er langfristig stofflich benötigt wird

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Die Umsetzung folgt der Infrastruktur

Preußisches Eisenbahngesetz, "Gesetz über die Eisenbahn-Unternehmungen„ von 1838 brachte Durchbruch der Eisenbahn und schaffte benötigte Arbeitsplätze

Der US “Federal-Aid Highway Act of 1956” schaffte 41.000 Meilen Highway für zivilen und militärischen Transport und führte zum Durchbruch des Pkw und Lkw in den USA.

Mit dem Wasserstoff-Startnetz wurde in Deutschland ein sehr guter strategischer Weg eingeschlagen, der weiter verfolgt werden sollte und ausgeweitet werden sollte.

Große Veränderungen erfordern nach guter Analyse und Konsultation Entscheidungen.
► Technologieoffenheit unter Rahmenbedingungen führt zur Optimierung.
► Technologieoffenheit ohne Rahmenbedingungen führt bei großen Veränderungen zum Verzetteln und zu entweder teuren oder nicht zieladäquaten Ausweichlösungen
► Neue Infrastrukturen sollten Raum für Wachstum bieten

► Stärkung der angewandten ökonomischen Forschung und Sozialforschung sowie Systemforschung
► Integriete Planung Strom, Wärme, Wasserstoff, Biogas, Geothermie etc.
► Regelungstechnik insbesondere auch auf Verbrauchsseite, Verteilnetze

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Prof. em. Dr.-Ing. Detlef Stolten

stolten@energy-transition-consulting.de

SCAN ME

ENERGY Transition CONSULTING

JÜLICH Forschungszentrum