



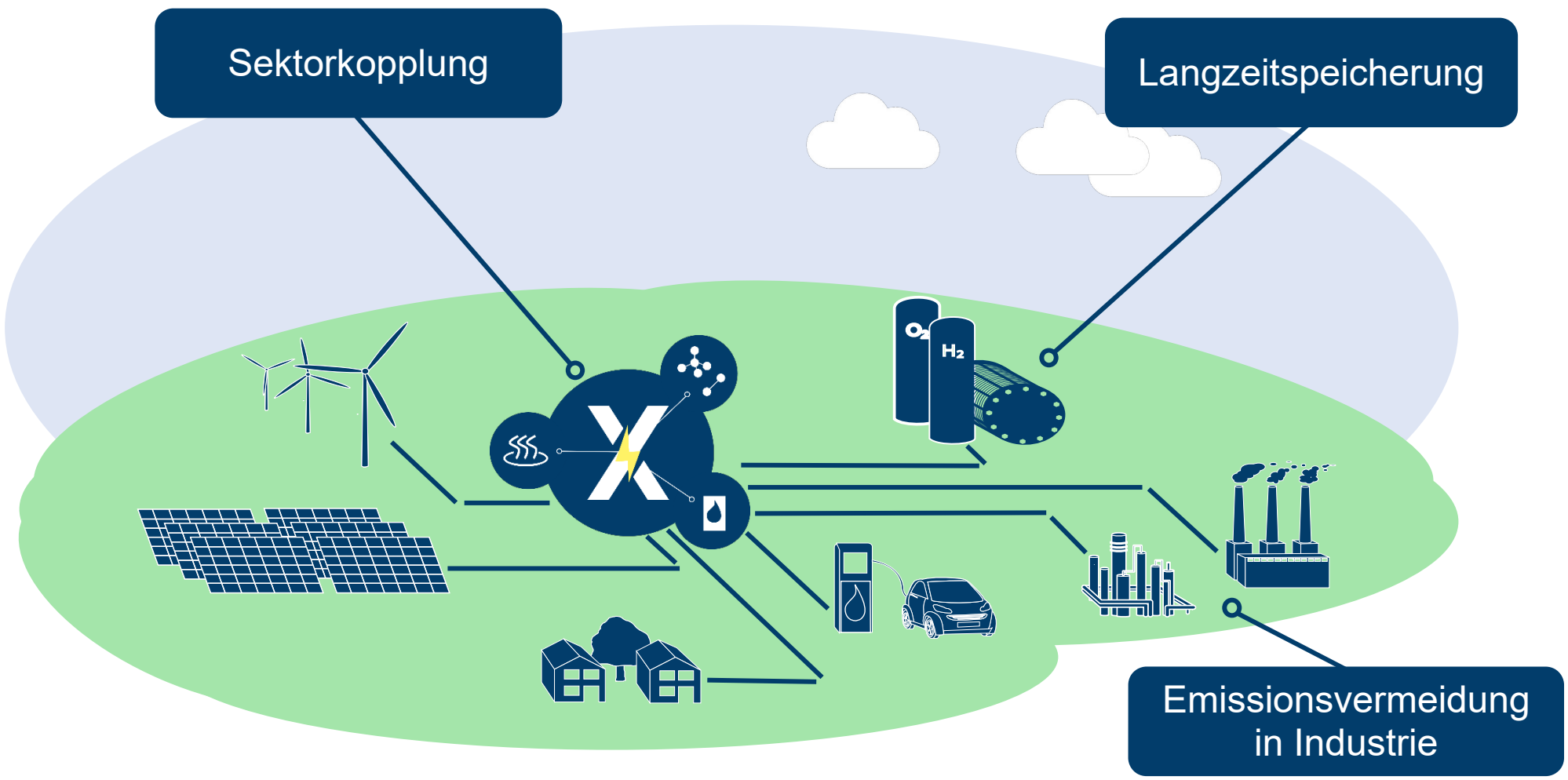
Der Markthochlauf von Power-to-X

ANALYSE EINES TREIBHAUSGASNEUTRALEN DEUTSCHEN ENERGIESYSTEMS

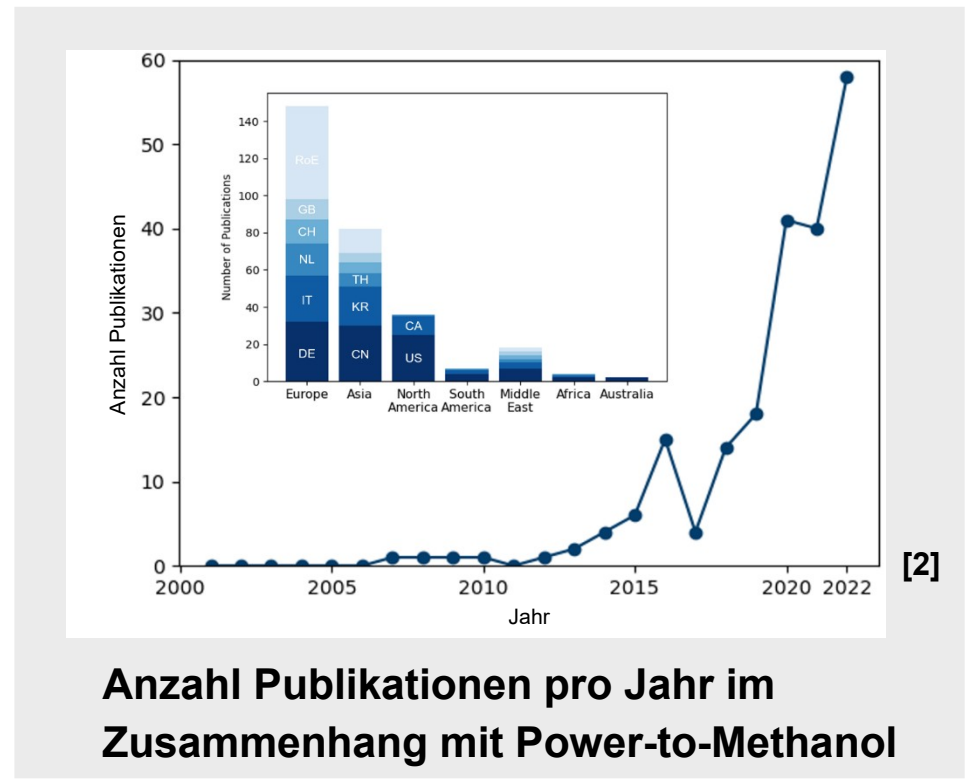
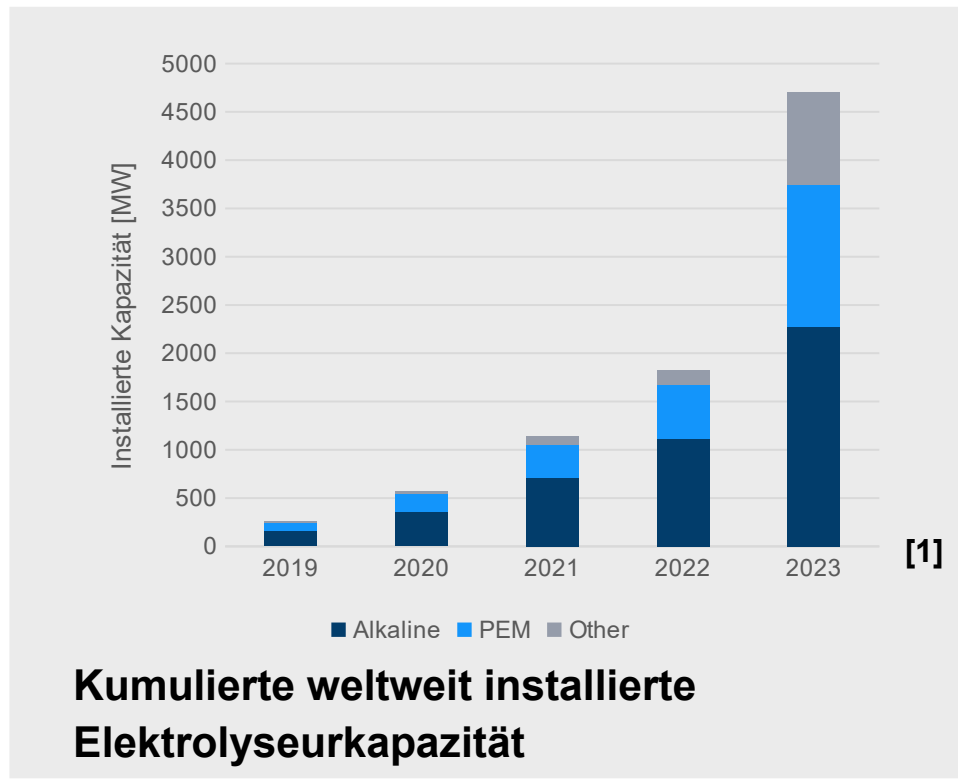
16.02.2024 | [GIAN MÜLLER](#), FELIX KULLMANN, JANN WEINAND, DETLEF STOLTEN

Power-to-X ist ein ideales Bindeglied zwischen fluktuierenden Erneuerbaren und Nachfrageseite

Hintergrund
Modellierung
Markthochlauf



Der Zubau von Power-to-X nimmt zunehmend Fahrt auf



Sowohl in der wissenschaftlichen Community als auch in der Industrie kann ein signifikantes Wachstum beobachtet werden!

[1]: IEA (2023): Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database
 [2]: G. Müller, F. Kullmann, J. Linßen, and D. Stolten (2024): The Costs of Future Energy Technologies: A Comprehensive Review of Power-to-X Processes, *Preprint Submitted To Joule*.

Zunehmendes Interesse an PtX hat Kostenreduktion zur Folge

Hintergrund

Modellierung

Markthochlauf



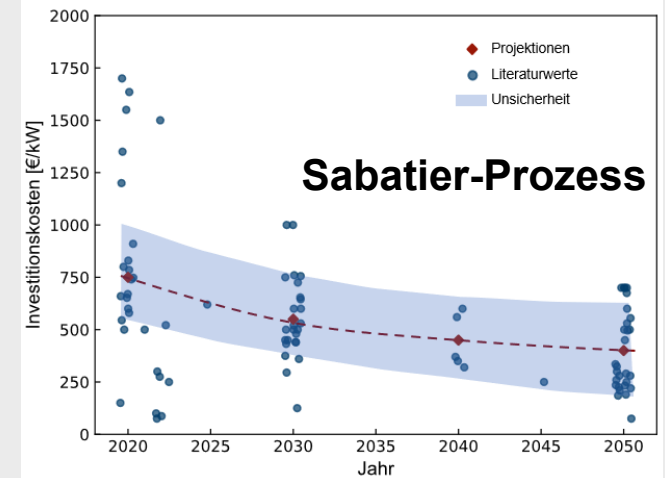
Aktuell bedeutend höhere Kosten als fossile Technologien aufgrund niedrigem Technologiereifegrad

Kostenreduktion durch technologischen Fortschritt und Skaleneffekte

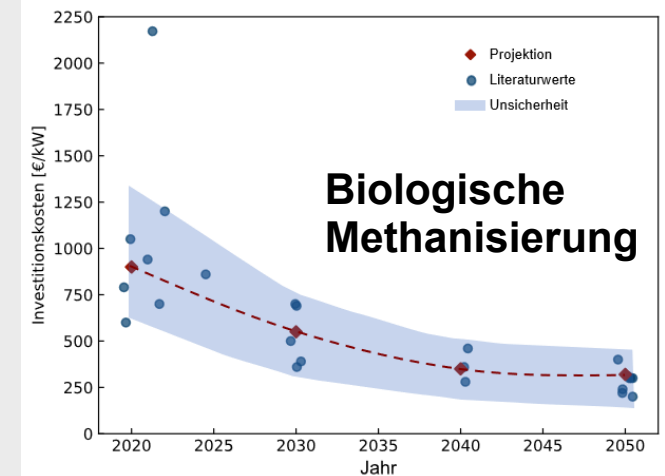
Hohe Unsicherheit in den Kostenprognosen erschweren Projektion des Markthochlaufs

Erwartete Kostenreduktionen führen zu Konkurrenzfähigkeit mit etablierten Prozessen

Strukturierter Literaturreview mit über 300 Publikationen



[1]



[1]

[1]: G. Müller, F. Kullmann, J. Linßen, and D. Stolten (2024): The Costs of Future Energy Technologies: A Comprehensive Review of Power-to-X Processes, *Preprint Submitted To Joule*.

Member of the Helmholtz Association

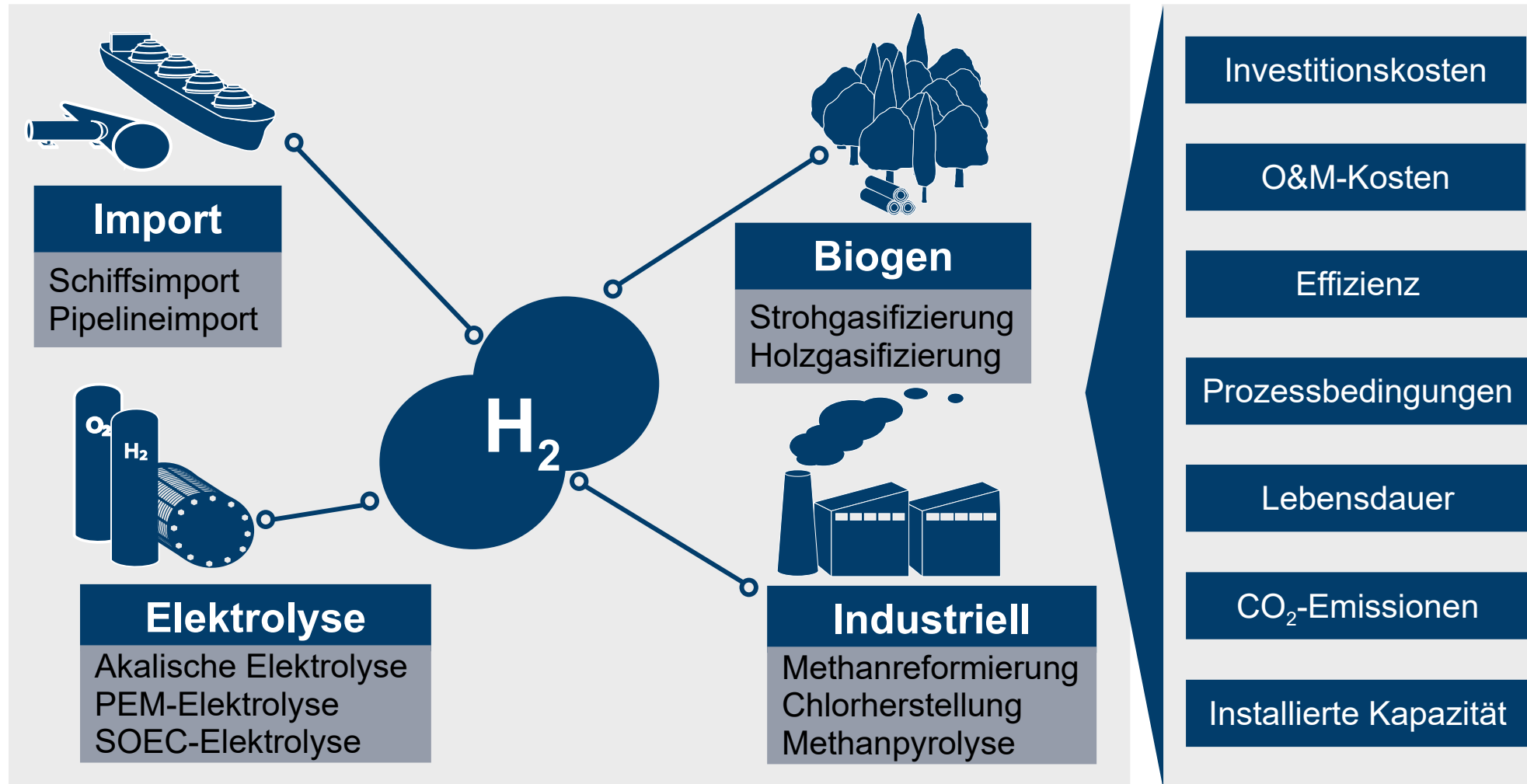
IEK-3: Techno-Economic Systems Analysis

Konkurrenzsituation zwischen Technologien wird von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst

Hintergrund

Modellierung

Markthochlauf

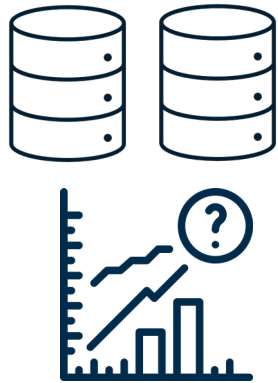


Markthochlauf wird durch Optimierung eines Energiesystemmodells analysiert

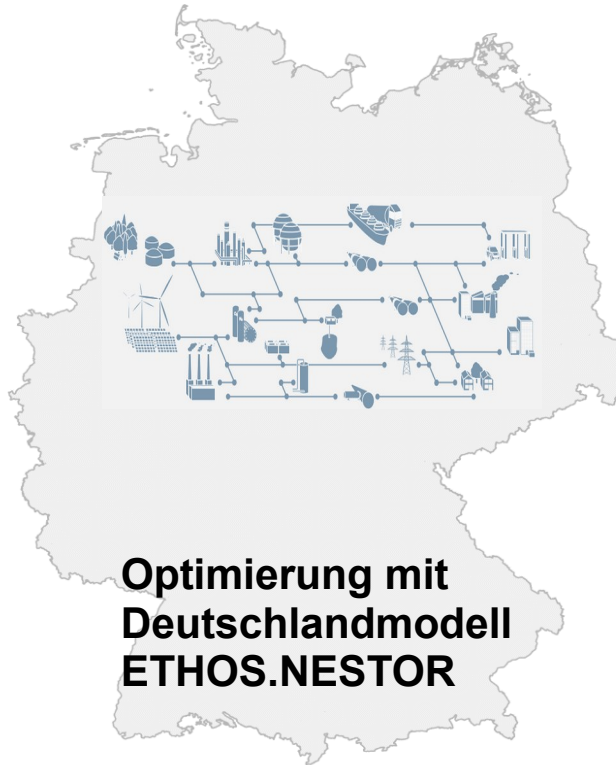
Hintergrund

Modellierung

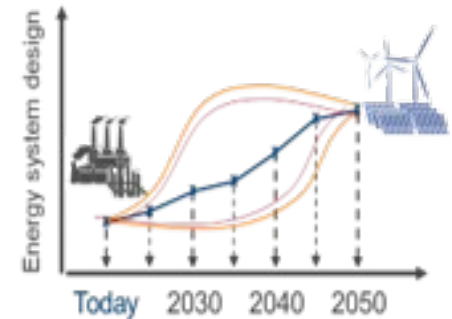
Markthochlauf



**Datenbank und
Kostenprojektionen
von über 1000
Technologien**



**Optimierung mit
Deutschlandmodell
ETHOS.NESTOR**



**Analyse des
kostengünstigsten
Transformationspfades**

Der Hochlauf der Elektrolyseure wird durch stark steigende Nachfrage ab 2030 katalysiert

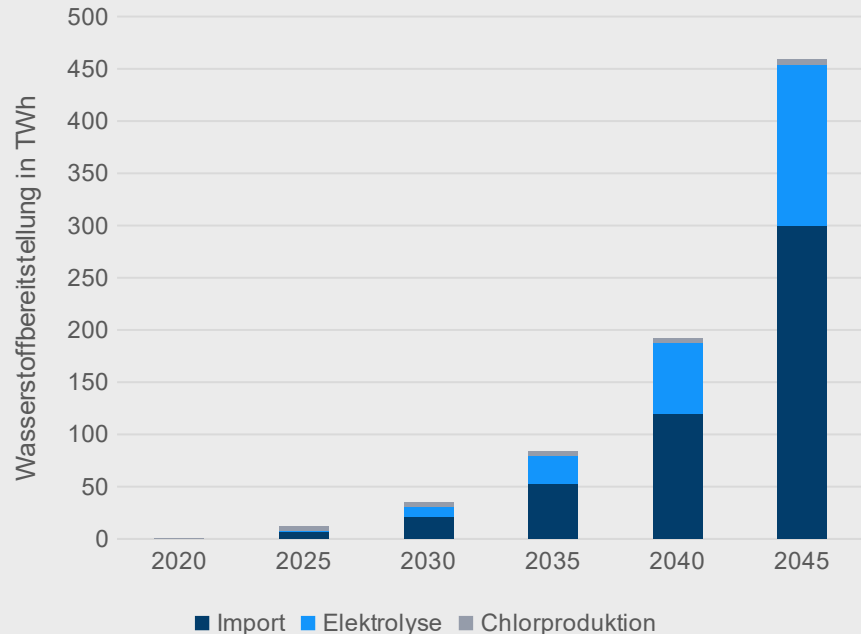
Hintergrund

Modellierung

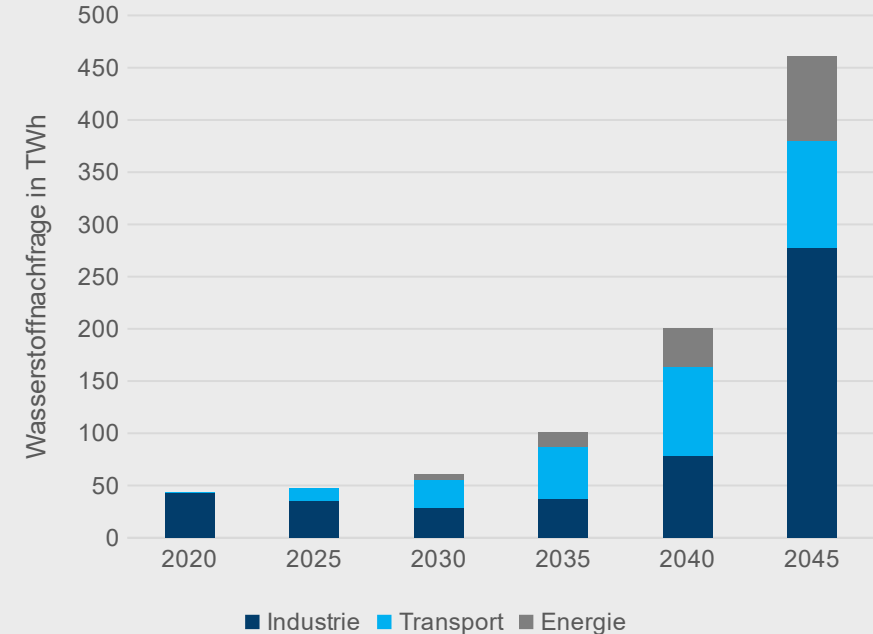
Markthochlauf



Produktion von grünem Wasserstoff



Wasserstoffnachfrage in Deutschland



- Großteil der Wasserstoff-Nachfrage ab 2035 durch grünen Wasserstoff gedeckt
- Erhöhte Nachfrage in Transport und Industrie durch Kombination von Ausbau der Elektrolyseure und erhöhtem Import

Wasserstoff findet vielfältige Anwendung in Industrie und Transport

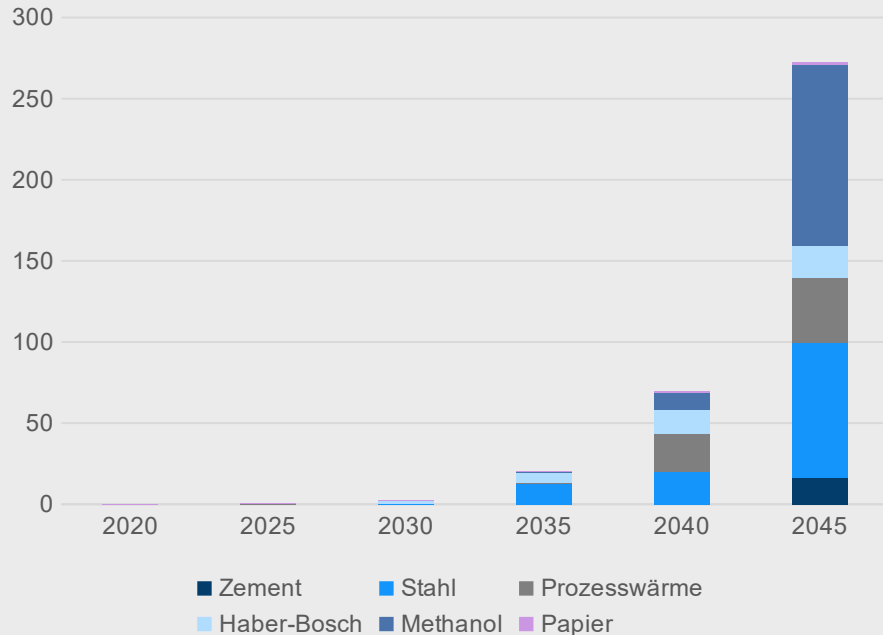
Hintergrund

Modellierung

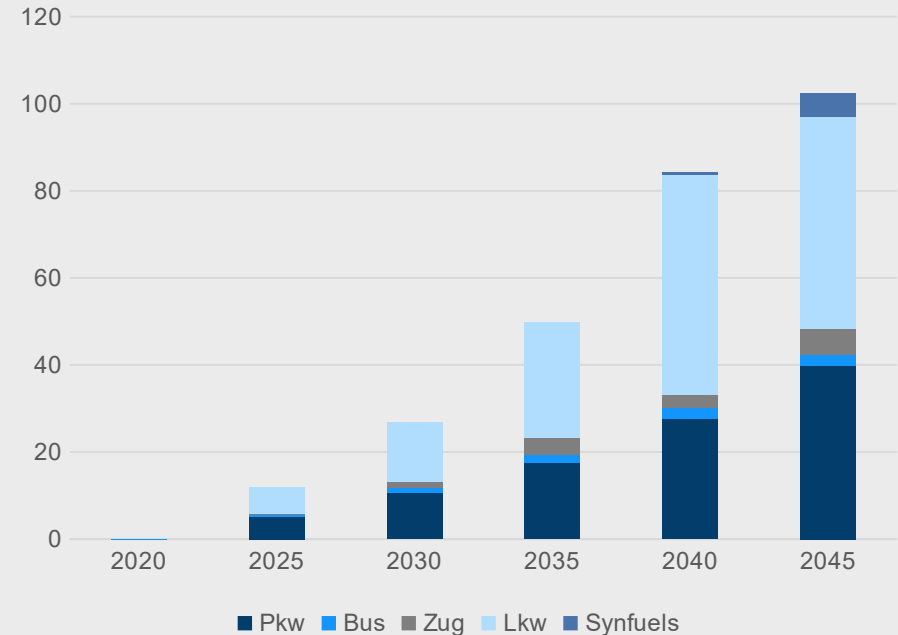
Markthochlauf



Wasserstoffbedarf in der Industrie



Wasserstoffbedarf im Transport



- Umstellung auf Wasserstoff erst ab 2035
- Stahl- und Methanolherstellung als treibende Kräfte

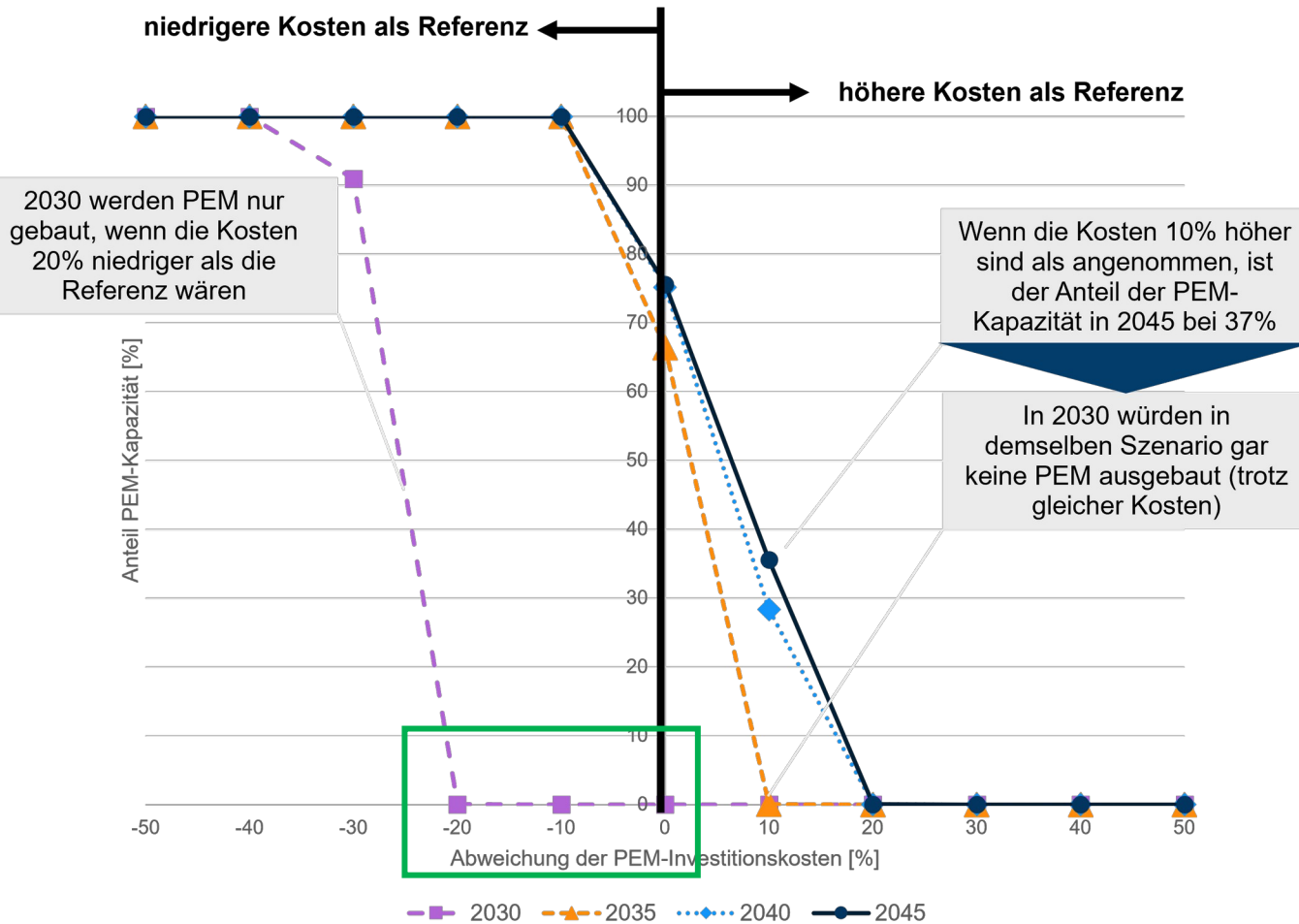
- Früherer Einsatz von Wasserstoff
- Vor allem für Pkw und Lkw relevant

Die kostengünstigere Alternative wird nicht immer ausgebaut

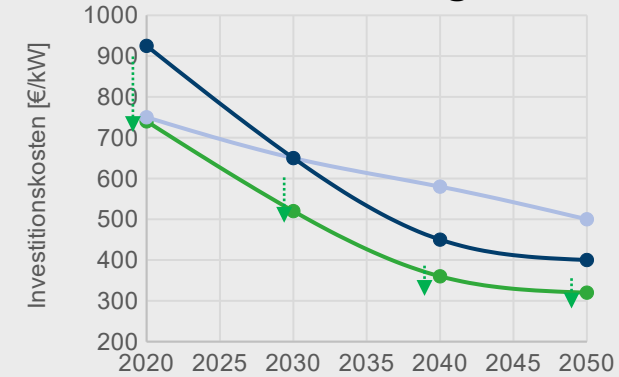
Hintergrund

Modellierung

Markthochlauf



Referenzkosten im Vergleich



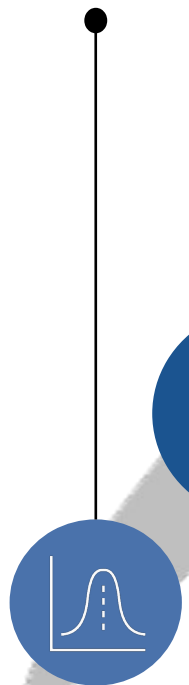
● PEM ● Alkaline
● PEM (20% weniger)

- Neben Kosten spielen andere Faktoren bedeutende Rolle (Wärmeauskopplung, Voraussicht etc.)
- Neue Technologien müssen (überproportional) viele Vorteile bringen

Erweiterung der Analyse um Monte-Carlo Simulation

Parametervariation durch randomisierten Auswahlalgorithmus

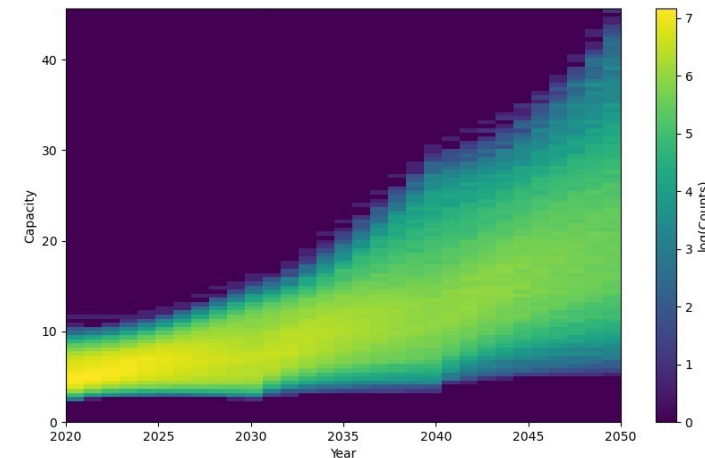
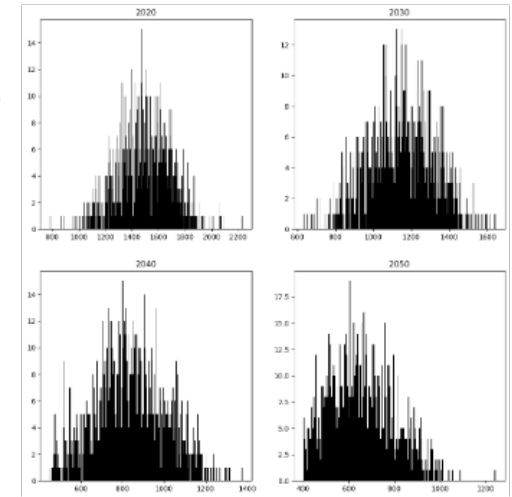
Monte-Carlo-Simulation



Aggregation des Energiesystems zur Komplexitätsreduktion



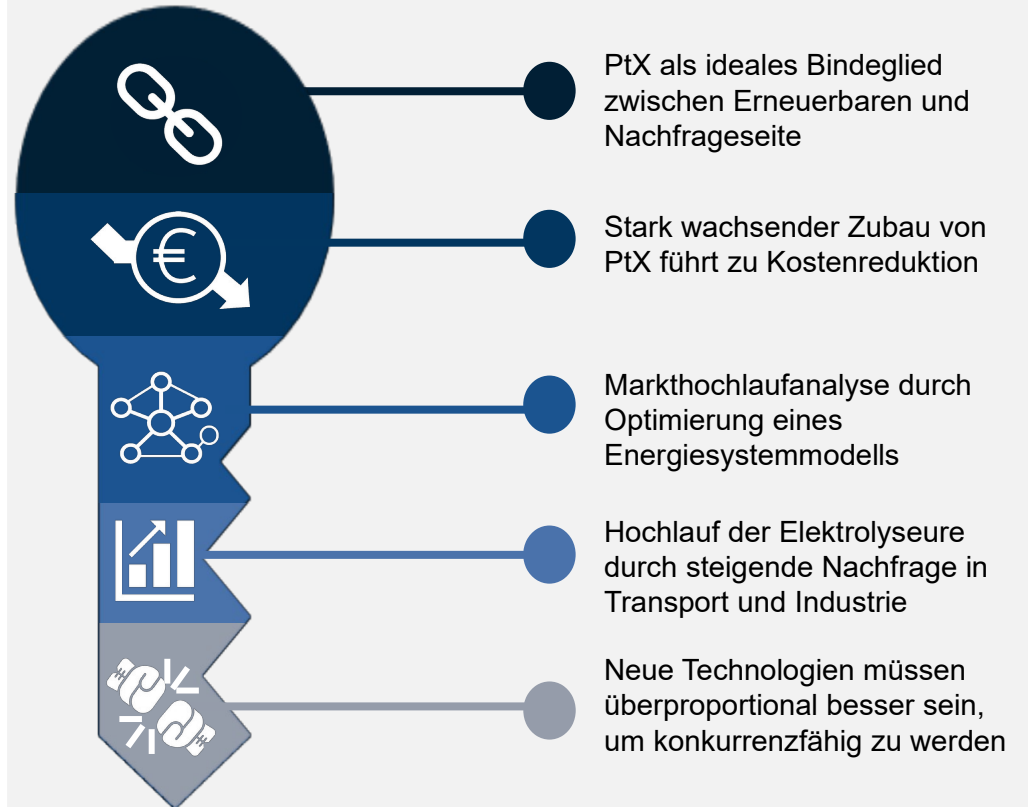
Analyse der Transformationspfadwahrscheinlichkeit und Sobol-Analyse der Parametereinflüsse



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Key Messages



Bei weiteren Fragen, bitte kontaktieren Sie:

Gian Müller
+49(0)2461 61 85446
g.mueller@fz-juelich.de

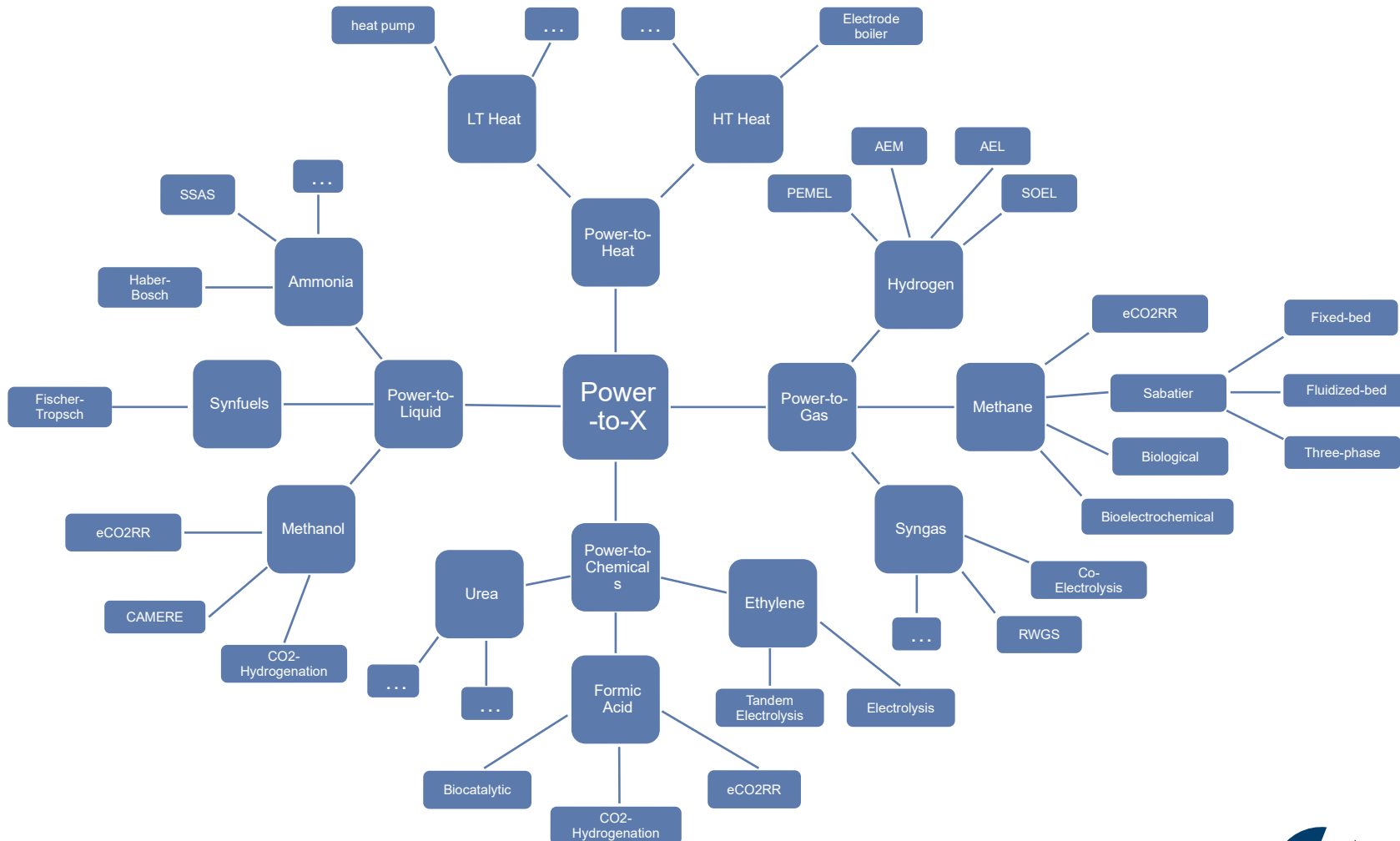
Prof. Dr. Detlef Stolten
+49(0)2461 61 5147
d.stolten@fz-juelich.de

Hintergrund

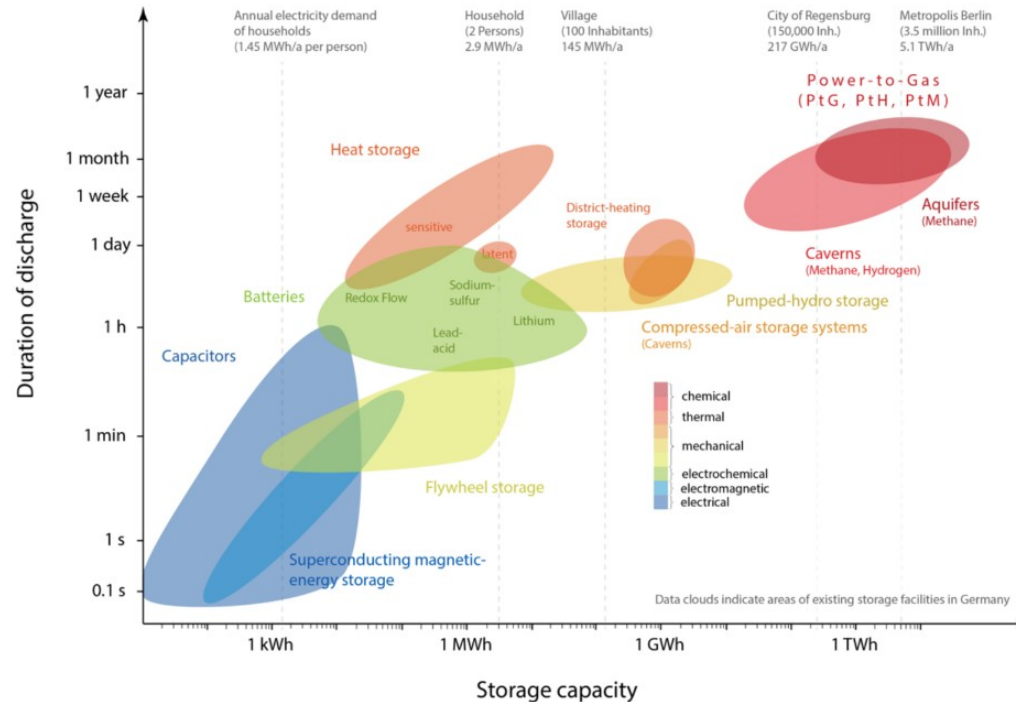
Methodik

Ergebnisse

Die Anzahl an PtX-Technologien ist enorm und können für eine Vielzahl an Plattformchemikalien eingesetzt werden



Power-to-X-Technologien bieten einzigartige Speichermöglichkeiten



Sterner, M., Specht, M., 2021. Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept. *Energies* 14, 6594. <https://doi.org/10.3390/en14206594>

Die meisten PtX-Prozesse sind direkt von der Wasserelektrolyse abhängig

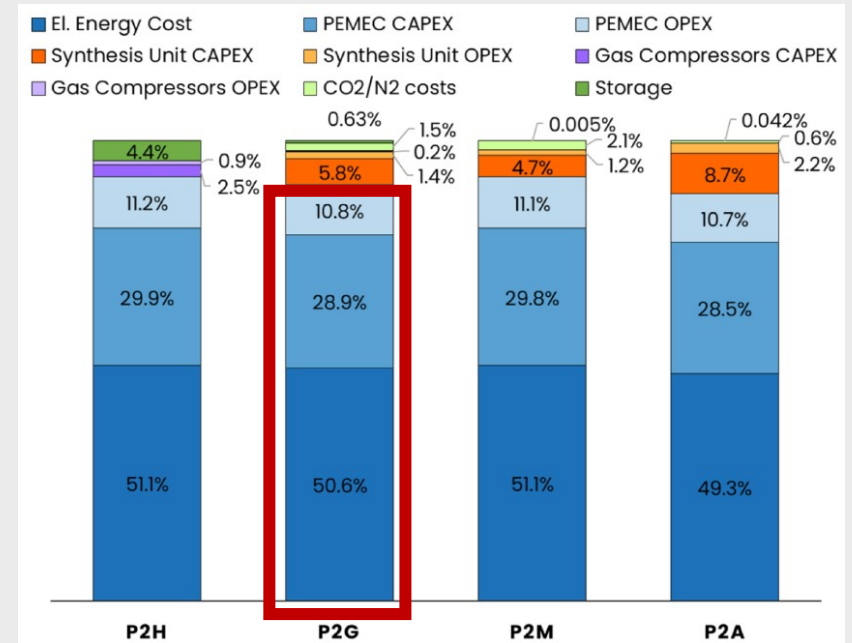
Die meisten PtX-Prozesse sind indirekt mit einem Zwischenschritt der Wasserelektrolyse

Wasserelektrolyseurkosten dominieren sowohl Investitions- als auch O&M-Kosten für PtX [1]

Direkte „Strom-zu-Produkt“-Prozesse sind meist technologisch nicht ausgereift

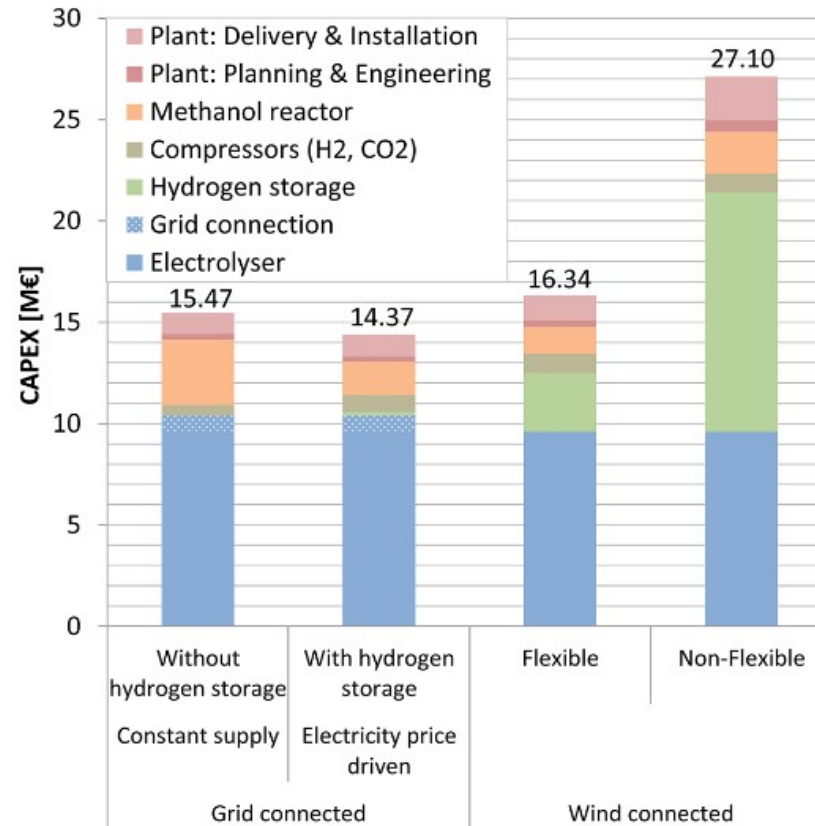
Indirekte Prozesse können Synergien mit etablierten Prozesse nutzen und sind damit meist kompetitiver

Aufteilung der Produktionskosten verschiedener PtX-Wege



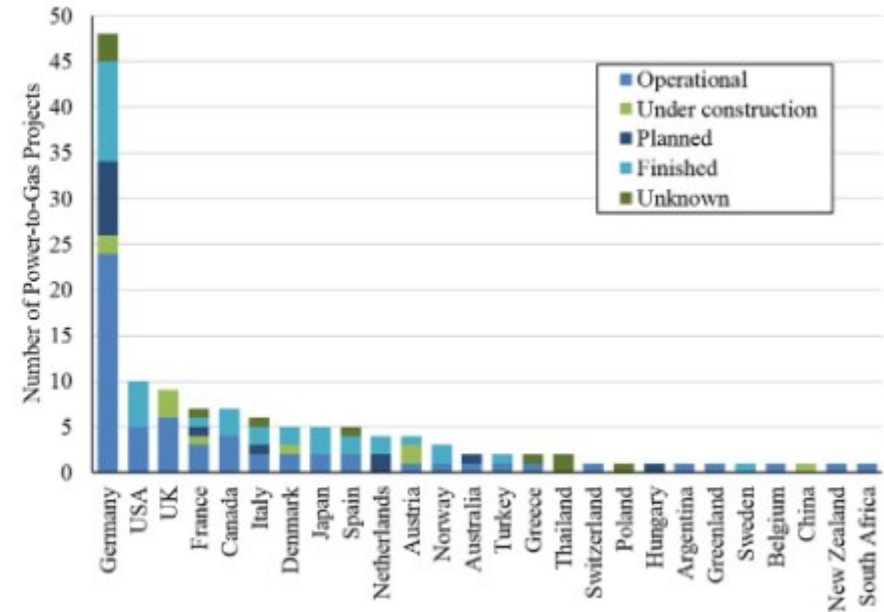
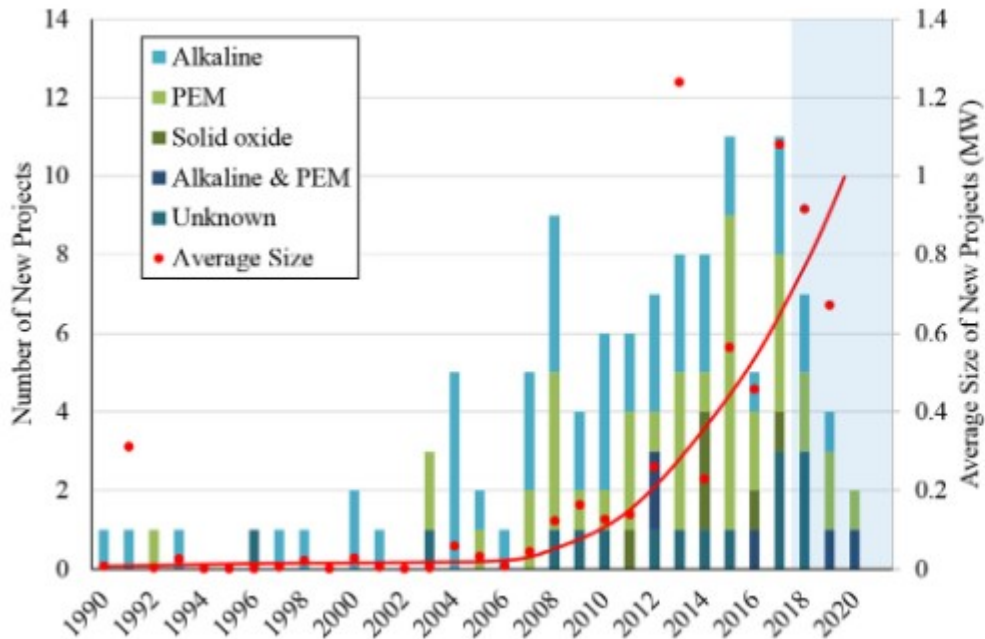
[1] Bellotti, D., Rivarolo, M., Magistri, L., 2022. A comparative techno-economic and sensitivity analysis of Power-to-X processes from different energy sources. Energy Conversion and Management 260, 115565. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115565>

Die meisten PtX-Prozesse sind direkt von der Wasserelektrolyse abhängig



C. Hank *u. a.*, „Economics & carbon dioxide avoidance cost of methanol production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide – power-to-methanol“, *Sustainable Energy Fuels*, Bd. 2, Nr. 6, S. 1244–1261, Mai 2018, doi: [10.1039/C8SE00032H](https://doi.org/10.1039/C8SE00032H).

Der Zubau von Power-to-X nimmt zunehmend Fahrt auf



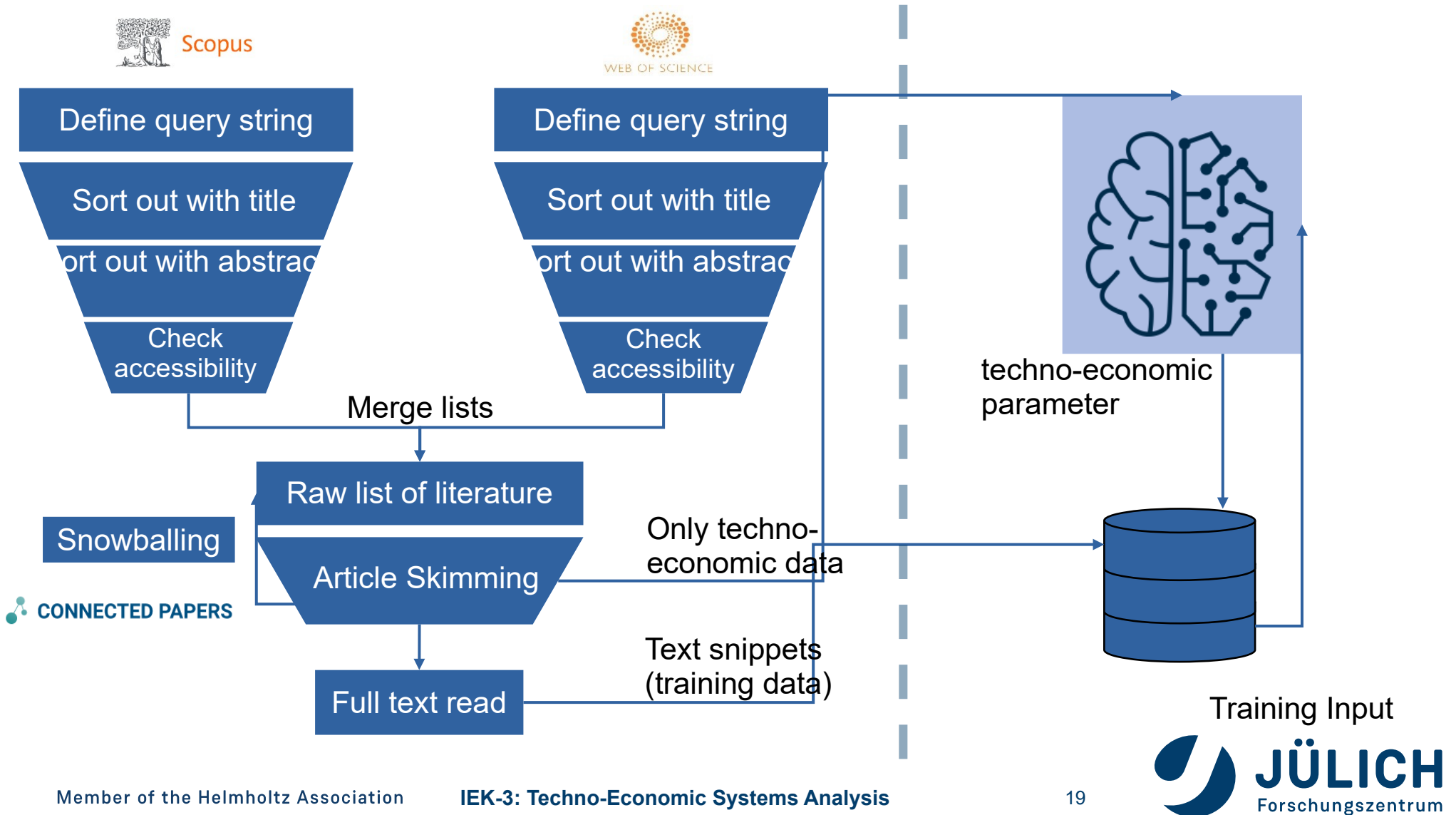
C. J. Quarton und S. Samsatli, „Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 98, S. 302–316, Dez. 2018, doi: [10.1016/j.rser.2018.09.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007).

Hintergrund

Methodik

Ergebnisse

Strukturierter (halb-automatisierter) Literaturreview



Die halbautomatisierte Datenauswertung funktioniert über drei Wege

Textanalyse

An investment cost for the electrolyzer unit equal to 550 V/kWh e has been assumed. The latter reflects the expected cost drop for large-scale alkaline electrolyser estimated in the literature into 500e600 V/kWh e [15]. Although current price Fig. e Specific electric consumption breakdown.

Table e Input data of the economic analysis. for Alkaline Electrolysis Cells are in order of

1000 V/kWh e, elicited expert estimates for 2030 capital costs reduction down to 500e600 V/kWh e due to production scale-up and R&D funding [47].

Taking into account all equipment involved, the estimated cost for the methanation is around 650 V/kW CH4. The latter is quite in line with data reported in the literature [15]. Lehner et al., (2014) [41] indicated an installed cost for methanation in the range 300e500 V/kW CH4. However there is a huge variability on this regards depending from adopted operating condition and process

Tabellenauswertung

Table 2. Average investment costs for the core components of PtG: alkaline and membrane electrolysis (alkaline, membrane (PEM)) and methanation (chemical, biological) for the MW class. The kW unit refers to the electrical power input of the electrolysis, not the gas flow rate [3].

Year	Alkaline Electrolysis in EUR/kW	Membrane Electrolysis in EUR/kW	Chemical Methanation in EUR/kW	Biological Methanation in EUR/kW
2010	1150	1650	1040	1600
2015	980	1350	870	1300
2020	850	1130	740	1050
2025	720	950	620	860
2030	620	780	520	690
2040	460	530	370	460
2050	330	350	260	300

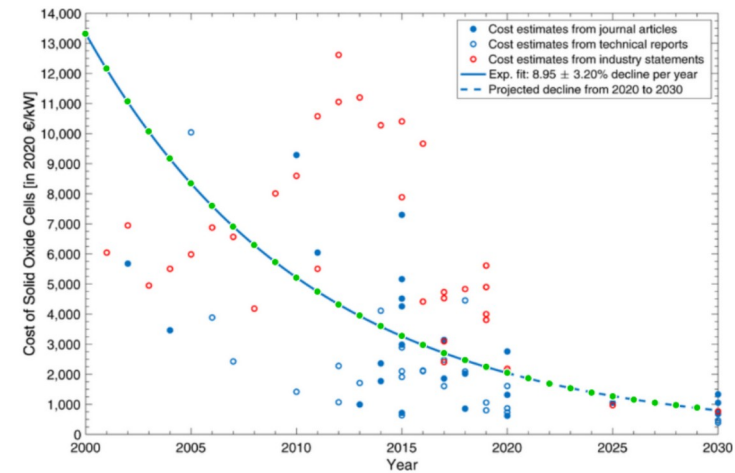
What all chemical plants have in common is that profitability with the high investment costs requires operation at high utilization rates. Three core factors favor the economic operation of PtG/PtX-plants:

1. low-cost, renewable electricity;
2. high capacity factors/utilization rates;
3. favorable regulatory frameworks due to no or low charges, taxes and levies.

3.9. Advantages and Opportunities

Power-to-Gas enables a bidirectional coupling of electricity and gas grids. This is the greatest opportunity: to use the convergence of these systems for a sustainable energy supply with electricity, heat and fuel on the basis of wind and solar electricity using the existing networks and infrastructures for distribution and storage.

Abbildungsauswertung



Scopus

TITLE-ABS-KEY ((*methan* OR sng OR "synthetic natural gas" AND NOT AND NOT ("methane" OR "methanation"))) AND (power-to-* OR (*methan* W/3 (renewabl*))) AND (techno-economic* "technoeconomic" OR "CAPEX" OR "investment costs" OR "economic assessment"))

Product

Process

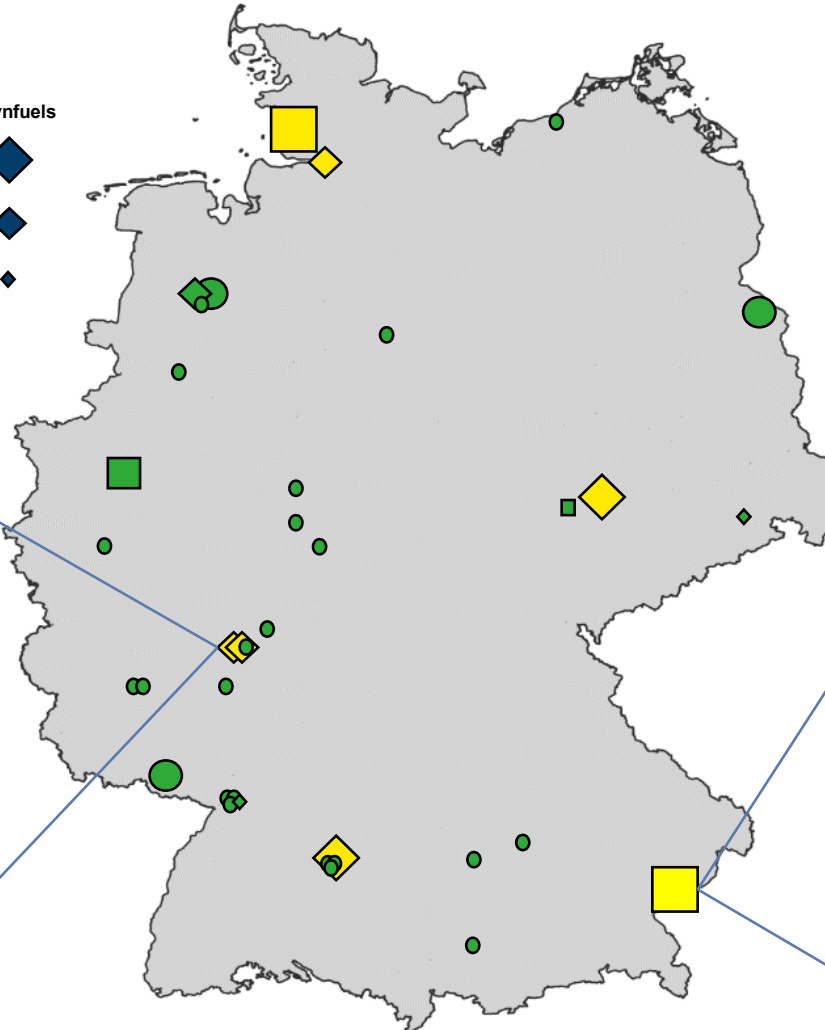
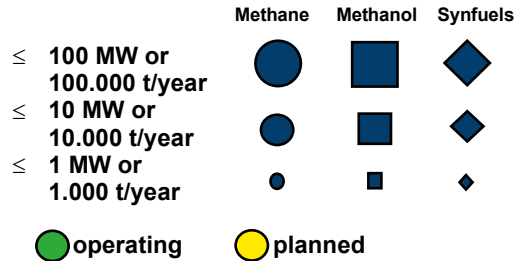
Parameters (techno-economic)

Hintergrund

Methodik


Ergebnisse

Deutschland ist weltweit führend bezüglich PtX-Anlagen



- Germany: technology leader in PtX processes
- Technological progress in Germany representative for global progress
- PtX demonstration projects in entire world are captured in database

Die Ineratec GmbH baut eine großindustrielle Power-to-Liquid-Anlage (PtL) in Frankfurt. Standort ist der Industriepark Höchst. Die Anlage wird jährlich bis zu 2.500 Tonnen nachhaltiges e-Fuel herstellen. Dabei werden aus CO₂ und grünem Wasserstoff flüssige Kohlenwasserstoffe (e-Fuels) produziert. Es sei „das erste großindustrielle PtL-Projekt in



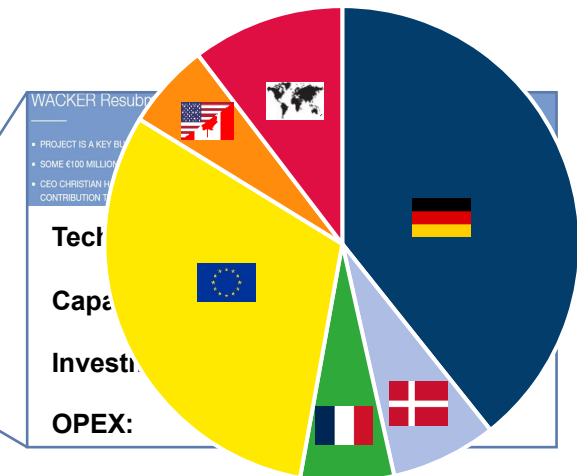
Fertigung der Module für die neue PtL-Anlage in Frankfurt © Ineratec GmbH / Martin Wagenhan

Technology: Fischer-Tropsch

Capacity: 2.500 t_{eFuels}/year

Investment: 30 Mio. €

OPEX: ?



Disclaimer: this figure is work in progress and makes no claim to be complete yet