

Hendrik Scharf

Technische Universität Dresden
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Lehrstuhl für Energiewirtschaft

Defossilisierung der Prozessindustrie in Deutschland – Welche Energiebedarfe sind zu erwarten?

18. Symposium Energieinnovation
Graz, 15. Februar 2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ: 03ET4055A

AGENDA

①

Motivation

CO₂-Vermeidungskosten als Werkzeug zur Bestimmung kosteneffizienter Transformationspfade

②

Hintergrund

Methodik zur Abschätzung künftiger Energiebedarfe

③

Ergebnisse

Bedarfe an Wasserstoff und Elektrizität

④

Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

AGENDA

①

Motivation

CO₂-Vermeidungskosten als Werkzeug zur Bestimmung kosteneffizienter Transformationspfade

②

Hintergrund

Methodik zur Abschätzung künftiger Energiebedarfe

③

Ergebnisse

Bedarfe an Wasserstoff und Elektrizität

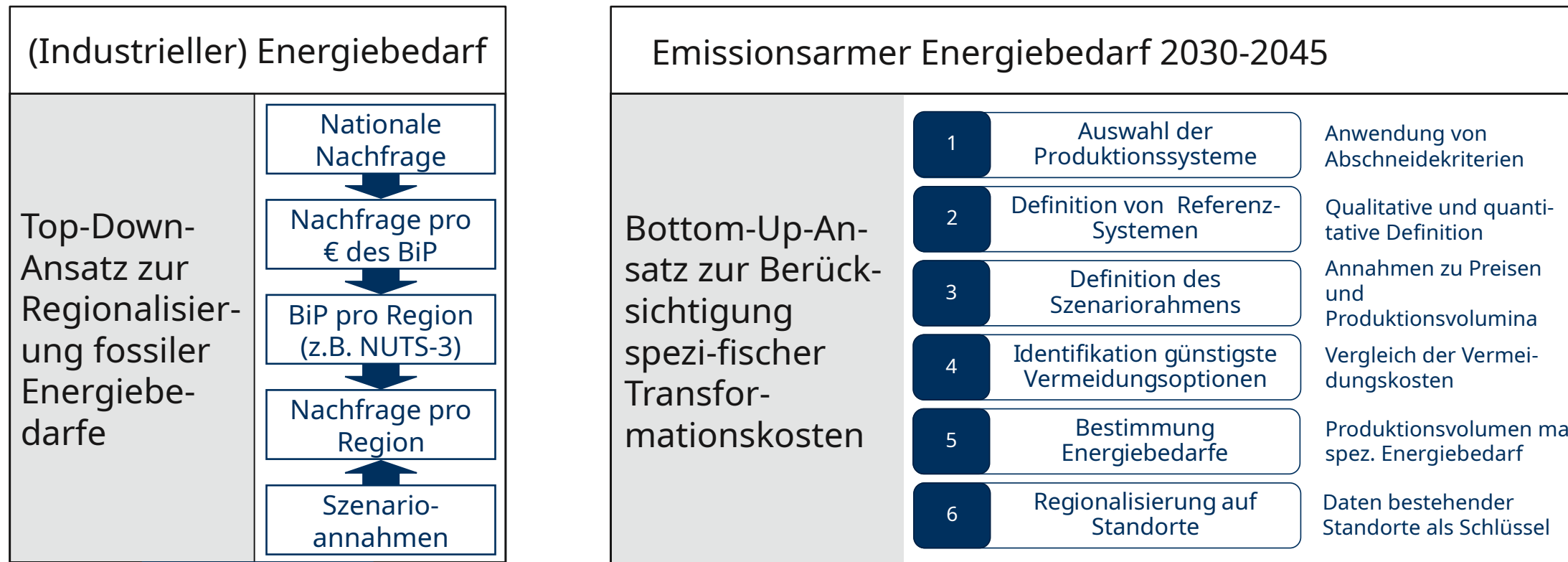
④

Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Abschätzung künftiger Energiebedarfe auf Basis von CO₂-Vermeidungskosten

Modellierung von Szenarien zur Abschätzung welche Energiebedarfe wann und wo zu erwarten sind



Optionen zur Defossilisierung:
 Direkte Elektrifizierung
 Brennstoffwechsel
 Energieeffizienzmaßnahmen
 [CO₂-Abscheidung und -Speicherung oder -Nutzung]

AGENDA

①

Motivation

CO₂-Vermeidungskosten als Werkzeug zur Bestimmung kosteneffizienter Transformationspfade

②

Hintergrund

Methodik zur Abschätzung künftiger Energiebedarfe

③

Ergebnisse

Bedarfe an Wasserstoff und Elektrizität

④

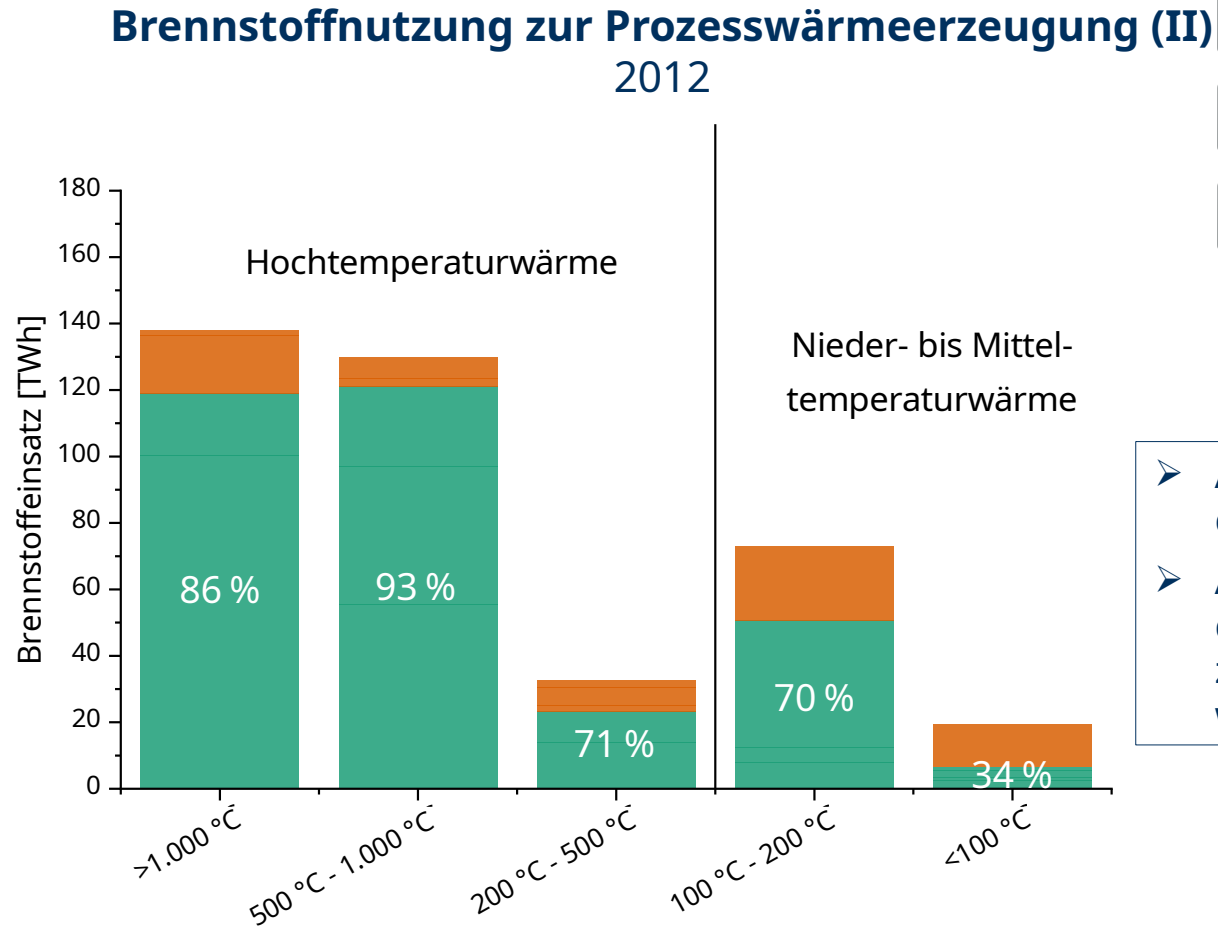
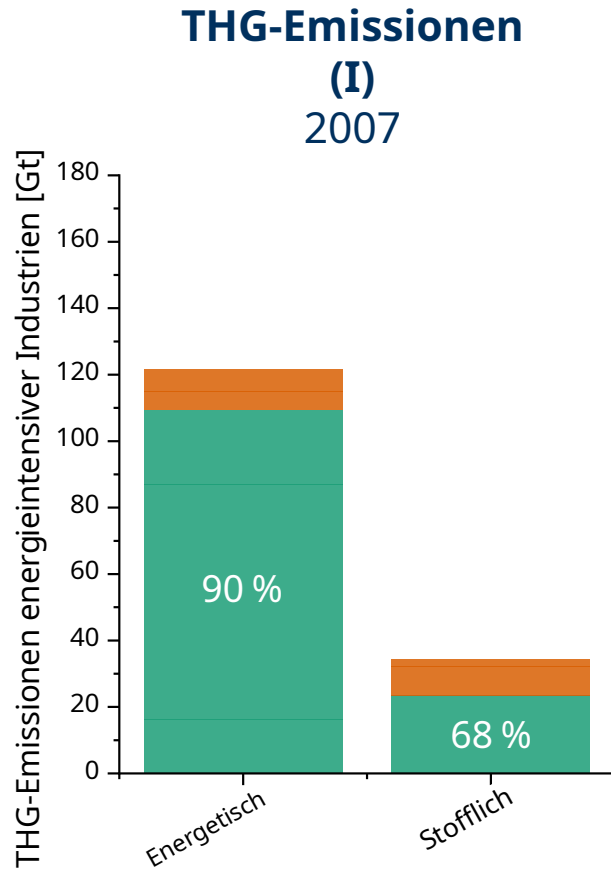
Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Berücksichtigte konventionelle Verfahren und Abschneidekriterien

Auswahl der Industrien anhand von THG-Emissionen (I) und des Brennstoffeinsatzes (II)

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte



- Abdeckung von 85 % der THG-Emissionen
- Abdeckung von 82 % des Brennstoffeinsatzes für die Prozesswärmeerzeugung

Berücksichtigte Verfahren

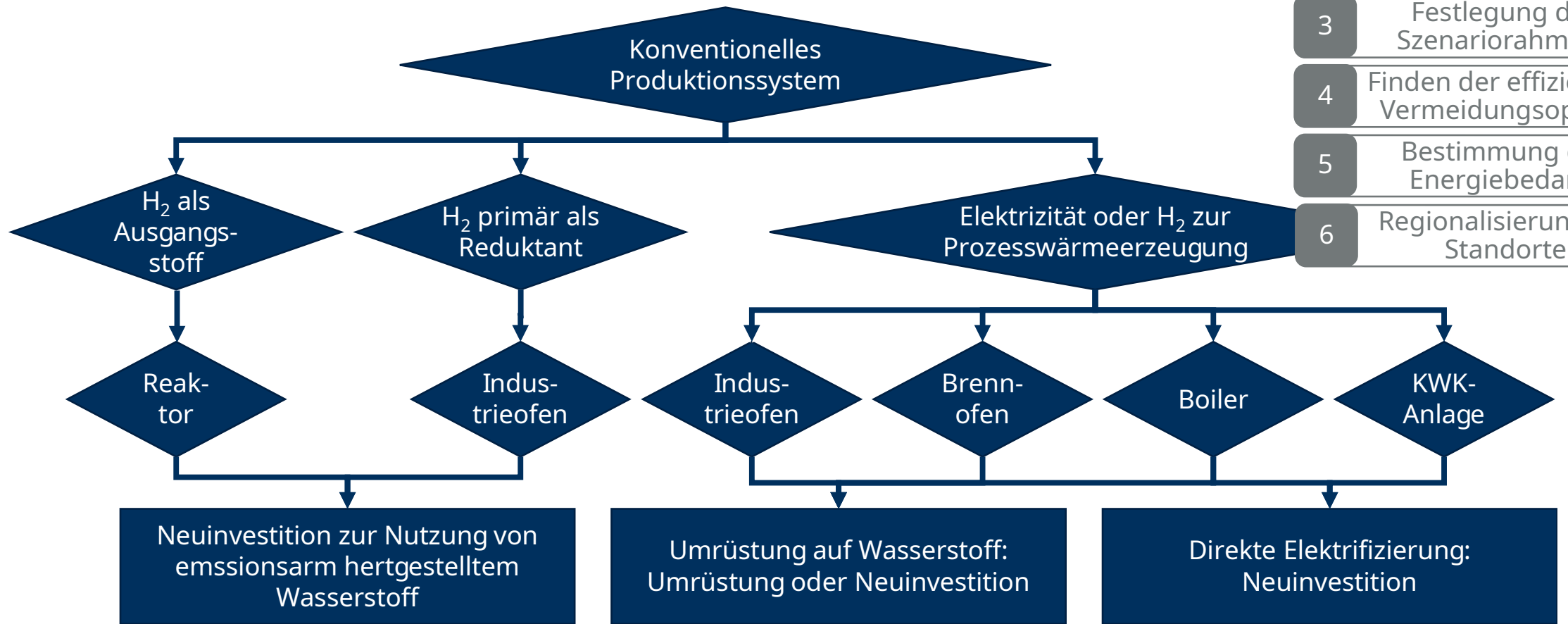
Vernachlässigte Verfahren

Datenquellen: Fleiter et al., 2013; Rehfeldt et al., 2018

Klassifizierung der Optionen zur Umstellung konventioneller Prozesse

Umstellung der Einsätze fossiler Energie als Reaktant, Reduktant oder zur Prozesswärmeerzeugung

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte



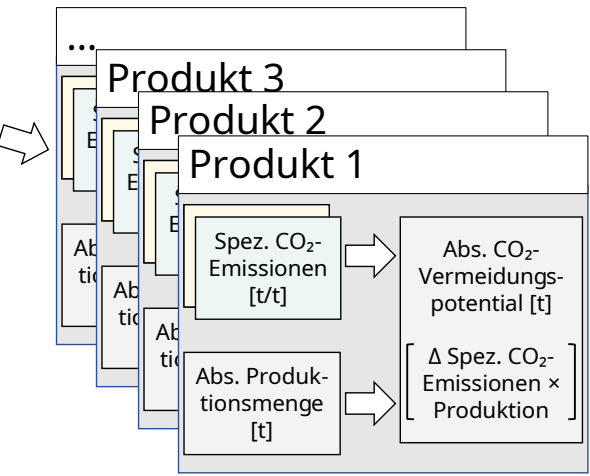
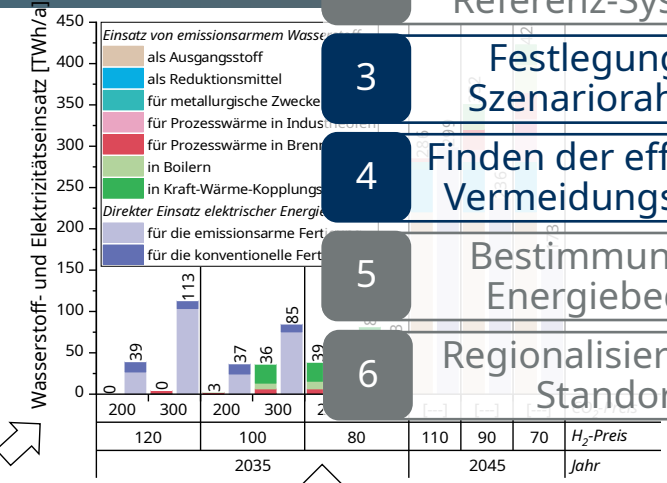
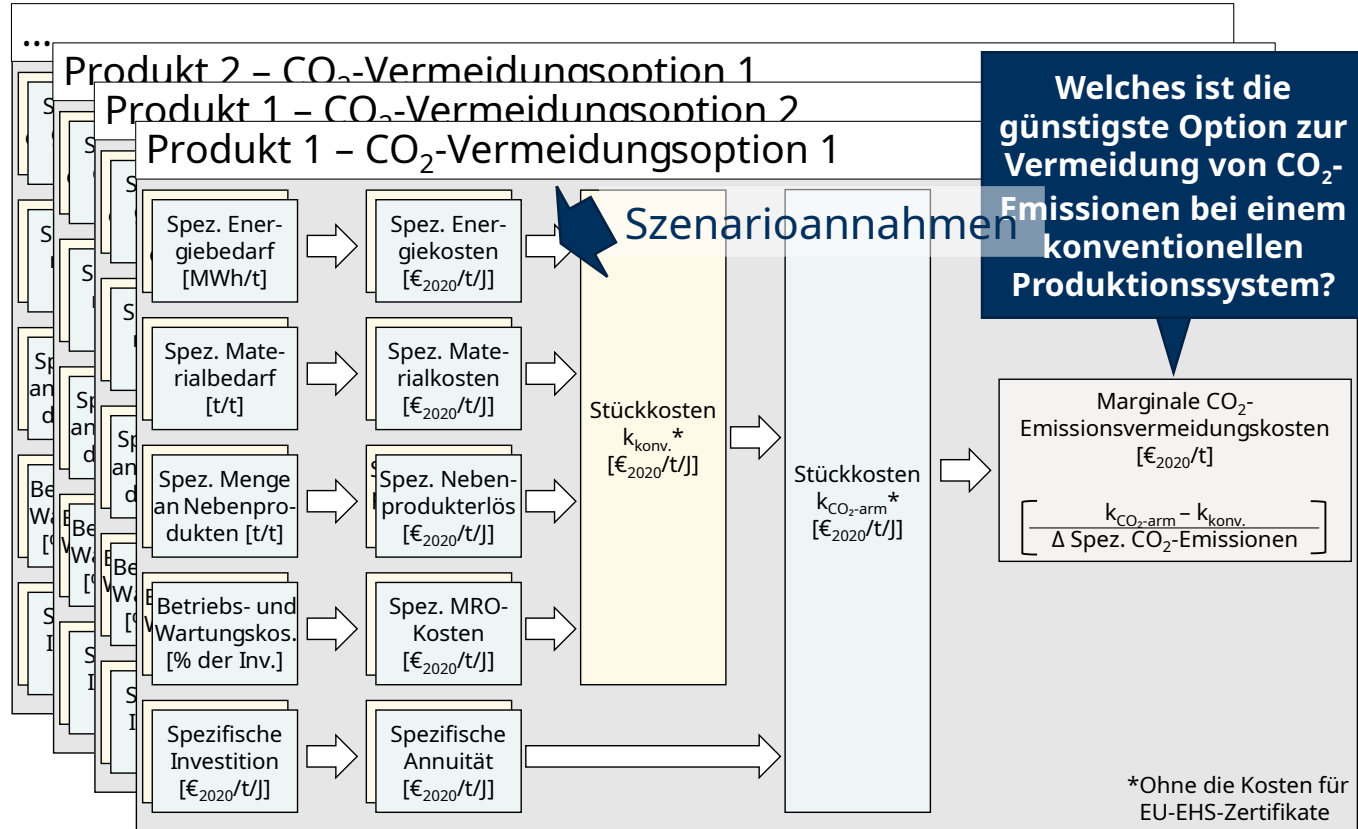
- Einbeziehung von 24 konventionellen Referenz-Produktionssystemen und 68 emissionsarme Verfahren.
- Die Konfiguration des konventionellen Referenz-Produktionssystem bedingt die verfügbaren emissionsarmen Optionen.

Methodik zur Bestimmung der künftiger Energienachfrage

Identifizierung der kostengünstigsten Vermeidungsoptionen unter den getroffenen Annahmen

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte

Recherche (Literatur, Verbände, Presse etc.)



Szenarioannahmen

Szenariorahmen

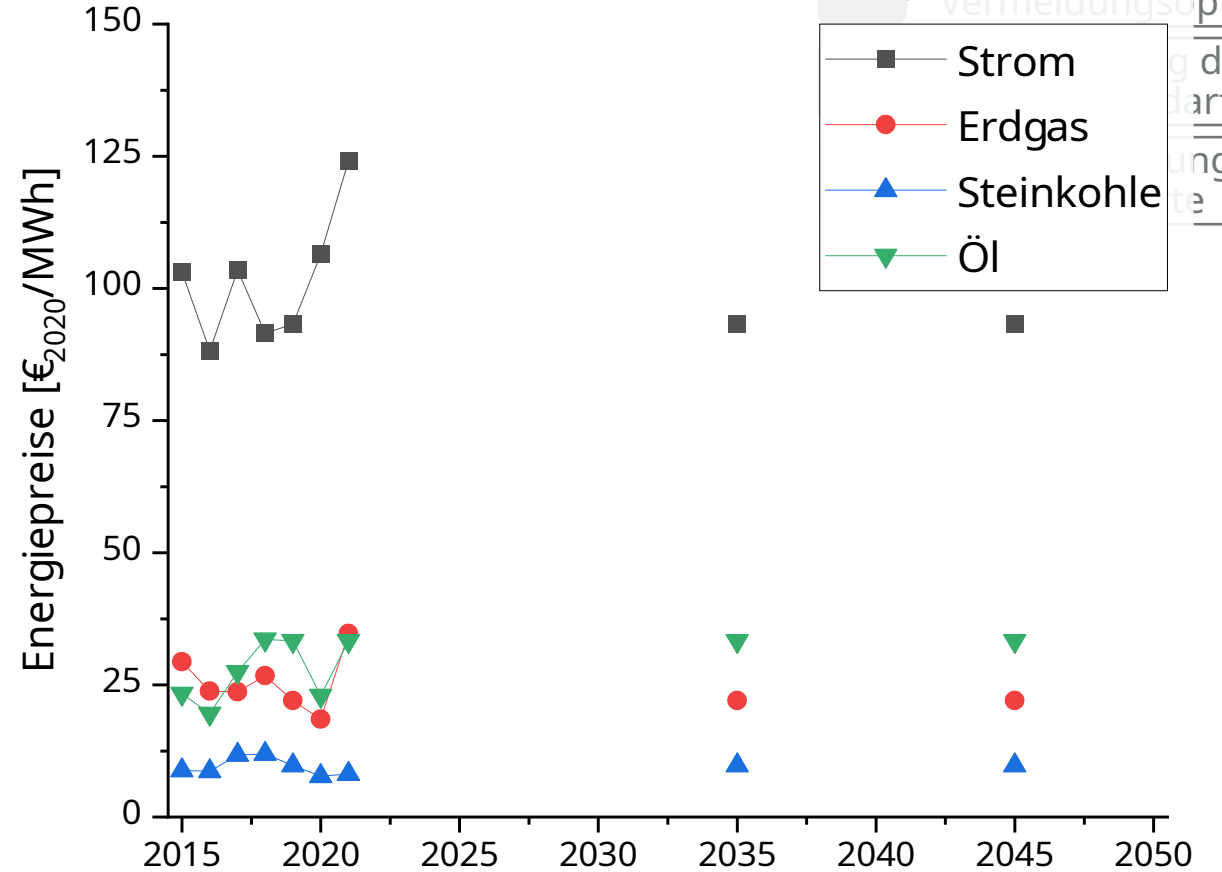
Die Szenarien variieren die H₂- und CO₂-Preise

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 **Festlegung des Szenariorahmens**

Szenarien (eigene Annahmen)

	<i>H₂-Preis</i>	<i>CO₂-Preis</i>
	<i>[€₂₀₂₀/MWh]</i>	<i>[€₂₀₂₀/t]</i>
2035	120	200
	120	300
	100	200
	100	300
	80	200
	80	300
2045	110	>1.000 (?)
	90	>1.000 (?)
	70	>1.000 (?)

Andere Energiepreise (übernommen aus dem Vorkrisenjahr 2019)



AGENDA

①

Motivation

CO₂-Vermeidungskosten als Werkzeug zur Bestimmung kosteneffizienter Transformationspfade

②

Hintergrund

Methodik zur Abschätzung künftiger Energiebedarfe

③

Ergebnisse

Bedarfe an Wasserstoff und Elektrizität

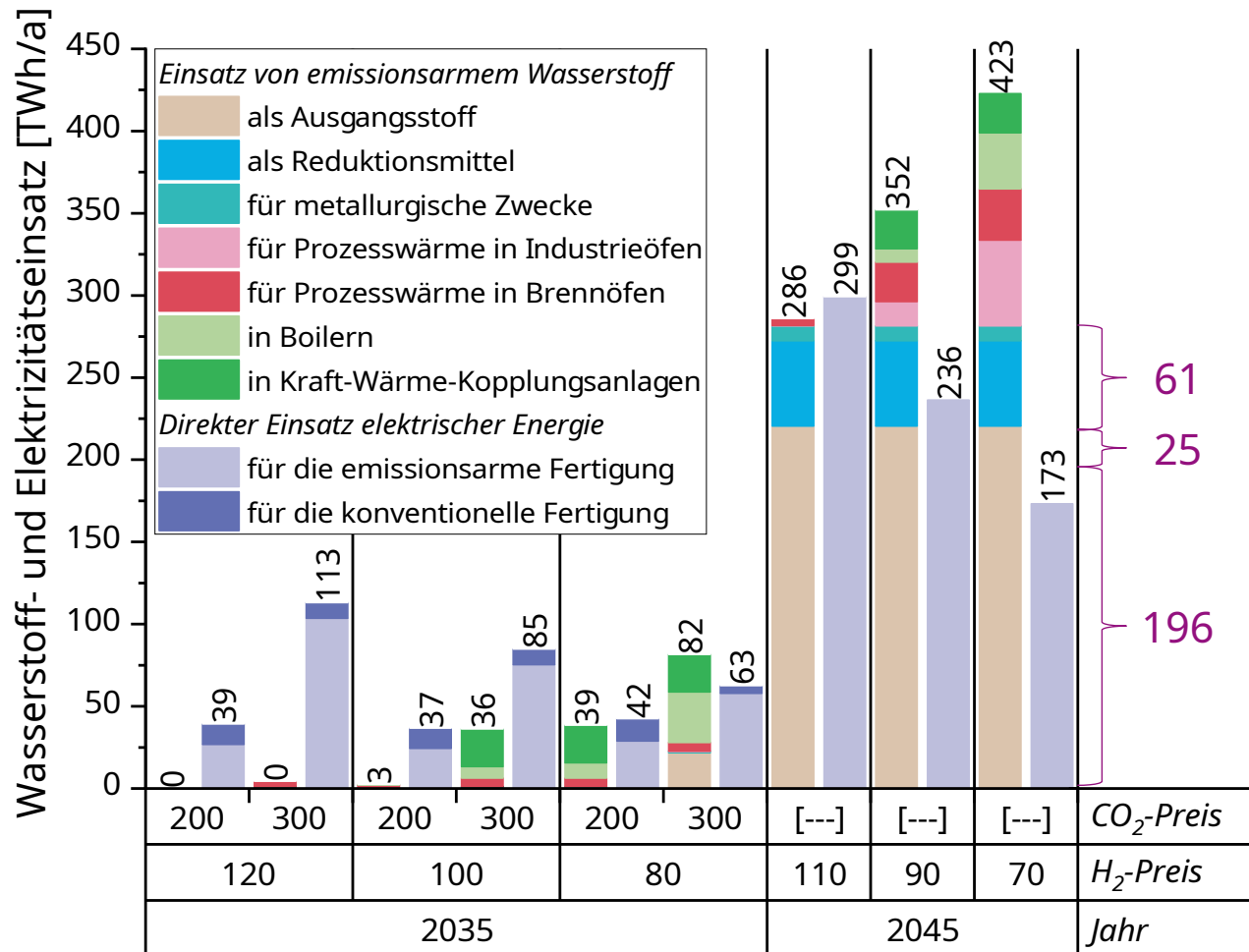
④

Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse der Szenarien zur künftigen Energienachfrage

Künftiger Wasserstoff- und Strombedarf in Abhängigkeit von Wasserstoff- und CO₂-Preisen

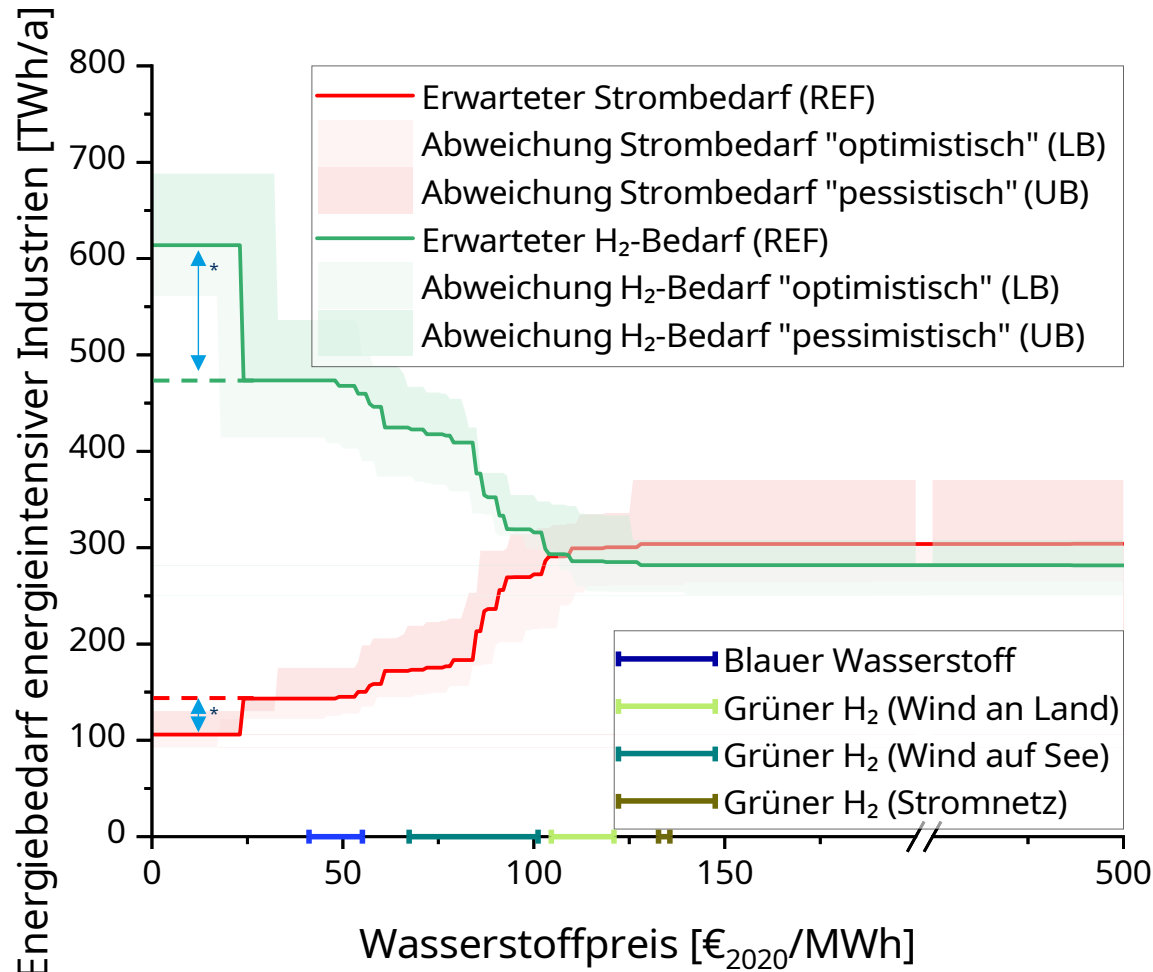


- Für das Jahr 2035 ergibt sich eine Wasserstoffnutzung zwischen 0 TWh und 82 TWh.
- Zusätzliche Nachfrage kann sich z.B. aus Pilotprojekten oder aufgrund von Subventionen ergeben.
- Außer in einem Szenario wird im Jahr 2035 der Wasserstoff lediglich für die Bereitstellung von Prozesswärme genutzt.
- 2045 beträgt alleine der Bedarf für das MtO-Verfahren 196 TWh, d.h. dass z.B. stattdessen weiterhin Rohbenzin zu verwenden starken Einfluss auf den Wasserstoffbedarf hätte.
- Weitere „No-Regret“-Einsatzzwecke für Wasserstoff sind die Ammoniak- sowie Methanolsynthesen (25 TWh) und die Produktion von Flüssigstahl (61 TWh).

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte

Sensitivitätsanalyse zu dem Wasserstoffpreis unter Klimaneutralität

Strom- und Wasserstoffbedarfe im Jahr 2045 in Abhängigkeit des Wasserstoffpreises



*Abweichung H₂-Steamcracker und MtO-Verfahren

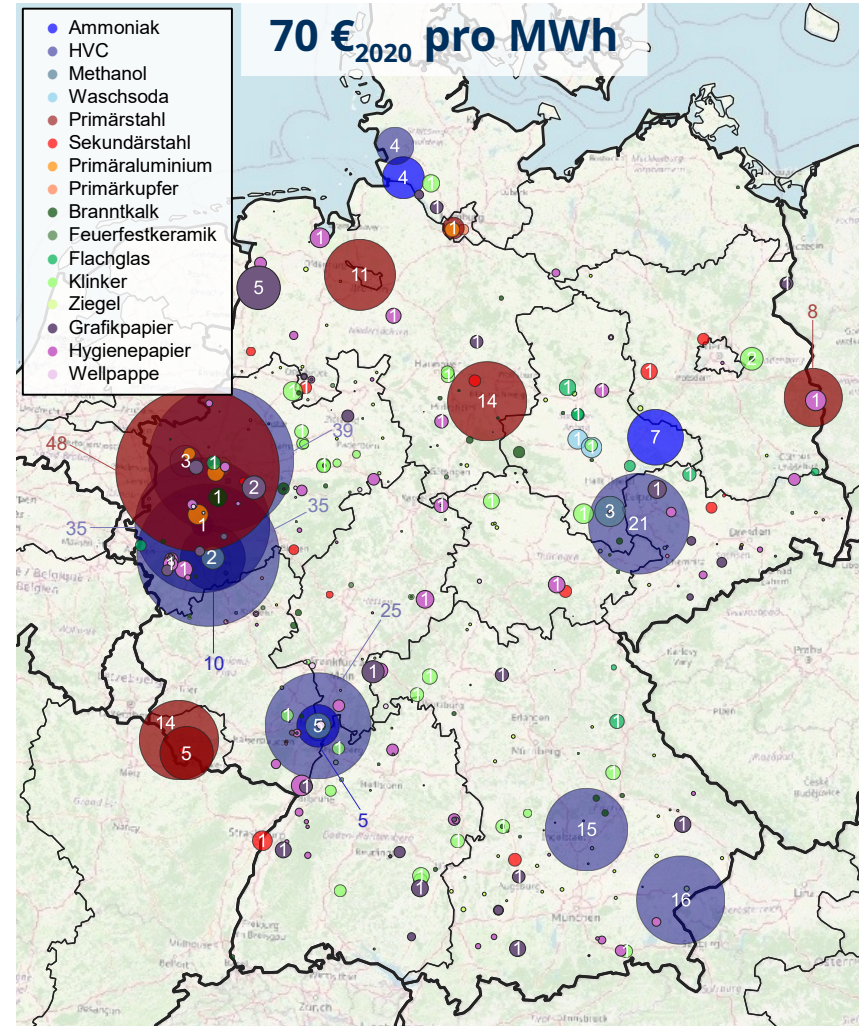
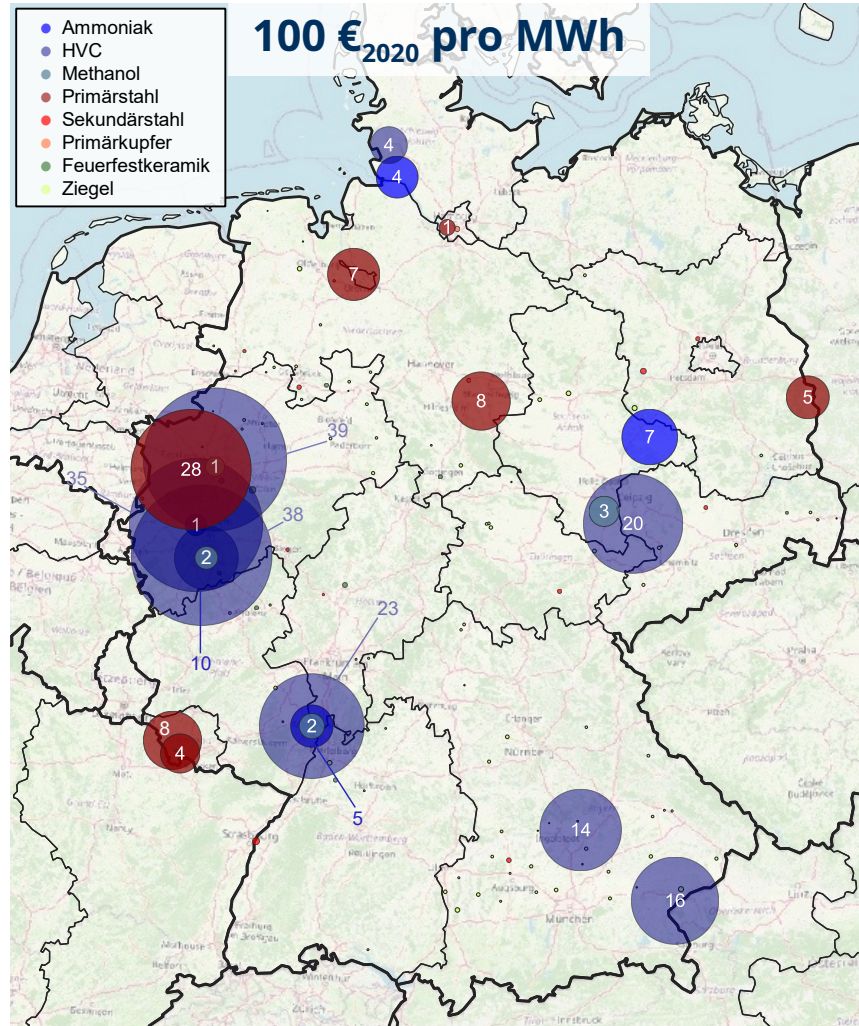
- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 **Bestimmung der Energiebedarfe**
- 6 Regionalisierung auf Standorte

- Die Potentialmenge für Wasserstoff des Industriesektors beläuft sich auf 473 TWh (+43 TWh, -60 TWh), die potentielle Menge an Strom für die direkte Elektrifizierung beträgt 304 TWh (+66 TWh, -37 TWh).
- Die Break-Even-Wasserstoffpreise liegen überwiegend bei 50₂₀₂₀/MWh bis 100 €₂₀₂₀/MWh.
- Bei Wasserstoffpreisen von mehr als 125 €₂₀₂₀ pro MWh werden nahezu alle Prozesse, bei denen dies möglich ist, direkt elektrifiziert.
- Zum Vergleich: Die Stromnachfrage des Industriesektors lag 2019 laut AGEB bei 218 TWh, die von Erdgas bei 221 TWh. Bereits der Wasserstoffbedarf für „No-Regret“-Anwendungen liegt bei 281 TWh (+26 TWh, -31 TWh). Insgesamt wurden in Deutschland 893 TWh an Erdgas umgesetzt.

Regionalisierung der Wasserstoffnachfrage

Standortbezogene Bedarfe im Jahr 2045 für die Wasserstoffpreise 100 €₂₀₂₀/MWh und 70 €₂₀₂₀/MWh

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte



Durchschnittliche Nachfrage eines Standorts je Branche:

- Stahl: 14,7 TWh
- Chemie: 10,5 TWh
- Sonst.: 0,1-0,3 TWh

➤ viele Standorte mit niedriger Nachfrage bei Industrien mit primär Prozesswärmebedarf

AGENDA

①

Motivation

CO₂-Vermeidungskosten als Werkzeug zur Bestimmung kosteneffizienter Transformationspfade

②

Hintergrund

Methodik zur Abschätzung künftiger Energiebedarfe

③

Ergebnisse

Bedarfe an Wasserstoff und Elektrizität

④

Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Fazit

Zusammenfassung, Ausblick und Diskussion

Wesentliche Ergebnisse

- Im Jahr 2035 ist der sich fundamental ergebende Wasserstoffbedarf stark von den getroffenen Szenarioannahmen abhängig und liegt zwischen 0 TWh und 82 TWh.
- Im Jahr 2045 ist die Wasserstoffnachfrage durch den Bedarf von sogenannten „No-Regret“-Anwendungen geprägt.
- Diese würden im Falle der Beibehaltung der Produktion in Deutschland punktuell sehr hohe Wasserstoffmengen nachfragen.
- Die Bedarfe für Prozesswärme fallen insgesamt geringer als die von „No-Regret“-Anwendungen aus und die standortbezogenen Mengen weisen eine deutlich stärkere Verteilung auf.

Weitere Aktivitäten

- Merit-Order von Prozessumstellungen
- Implementierung der erhobenen techno-ökonomischen Daten und der Standortdaten in ein Netzausbaumodell.
- Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffnachfrage auf Wasserstoffpreise in einem Wasserstoffmarktmodell

Offene Fragen

- ❖ Nutzbarmachung des Wasserstoffelektrolyse-Nebenprodukts Sauerstoff
- ❖ Verlegung von Wertschöpfungsstufen ins Ausland
- ❖ Leitungsumrüstungen oder -neubau

Thank you for your attention!

Hendrik Scharf

Tel.: +49 (0) 351/463-39008

Email: hendrik.scharf@tu-dresden.de

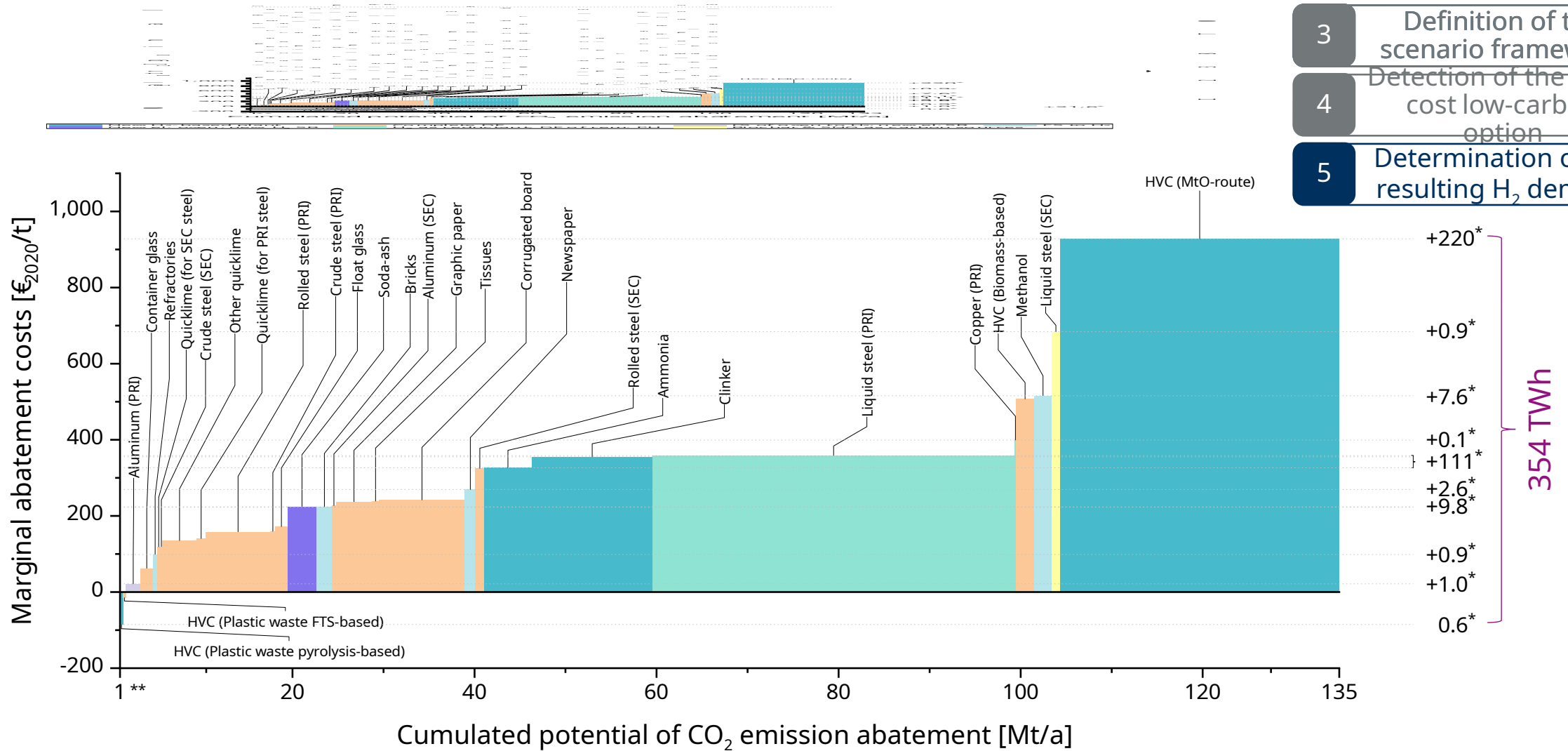
Web: www.ee2.biz

Technische Universität Dresden
Faculty of Business and Economics
Chair of Energy Economics
Münchner Platz 3
01069 Dresden

Exemplary marginal CO₂ abatement cost curve

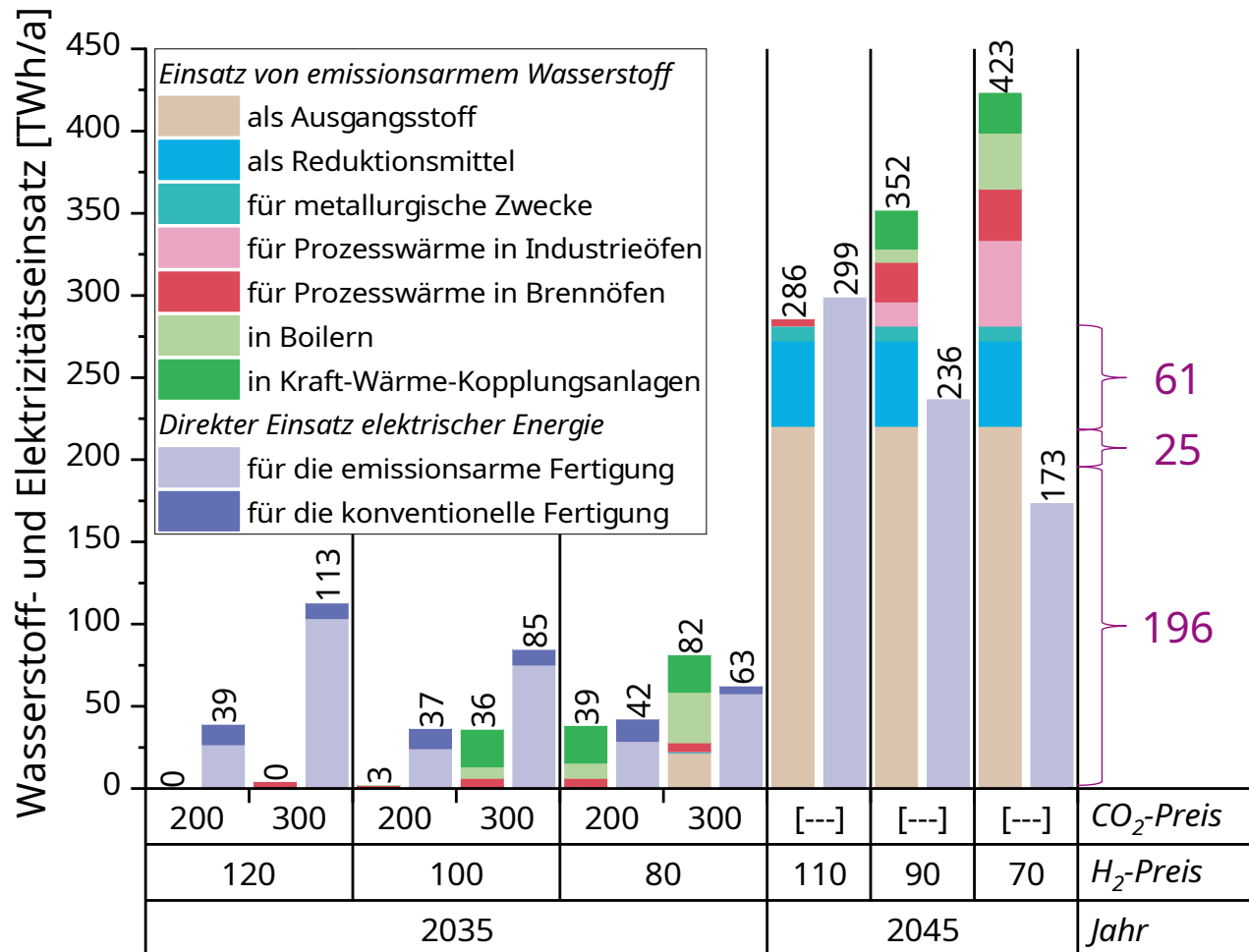
Merit-Order of the least-cost low-carbon options in 2035, assuming a H₂ price of 100 €₂₀₂₀/MWh

- 1 Selection of industries
- 2 Specification of the reference prod. systems
- 3 Definition of the scenario framework
- 4 Detection of the least-cost low-carbon option
- 5 Determination of the resulting H₂ demand



Ergebnisse der Szenarien zur künftigen Energienachfrage

Künftiger Wasserstoff- und Strombedarf in Abhängigkeit von Wasserstoff- und CO₂-Preisen



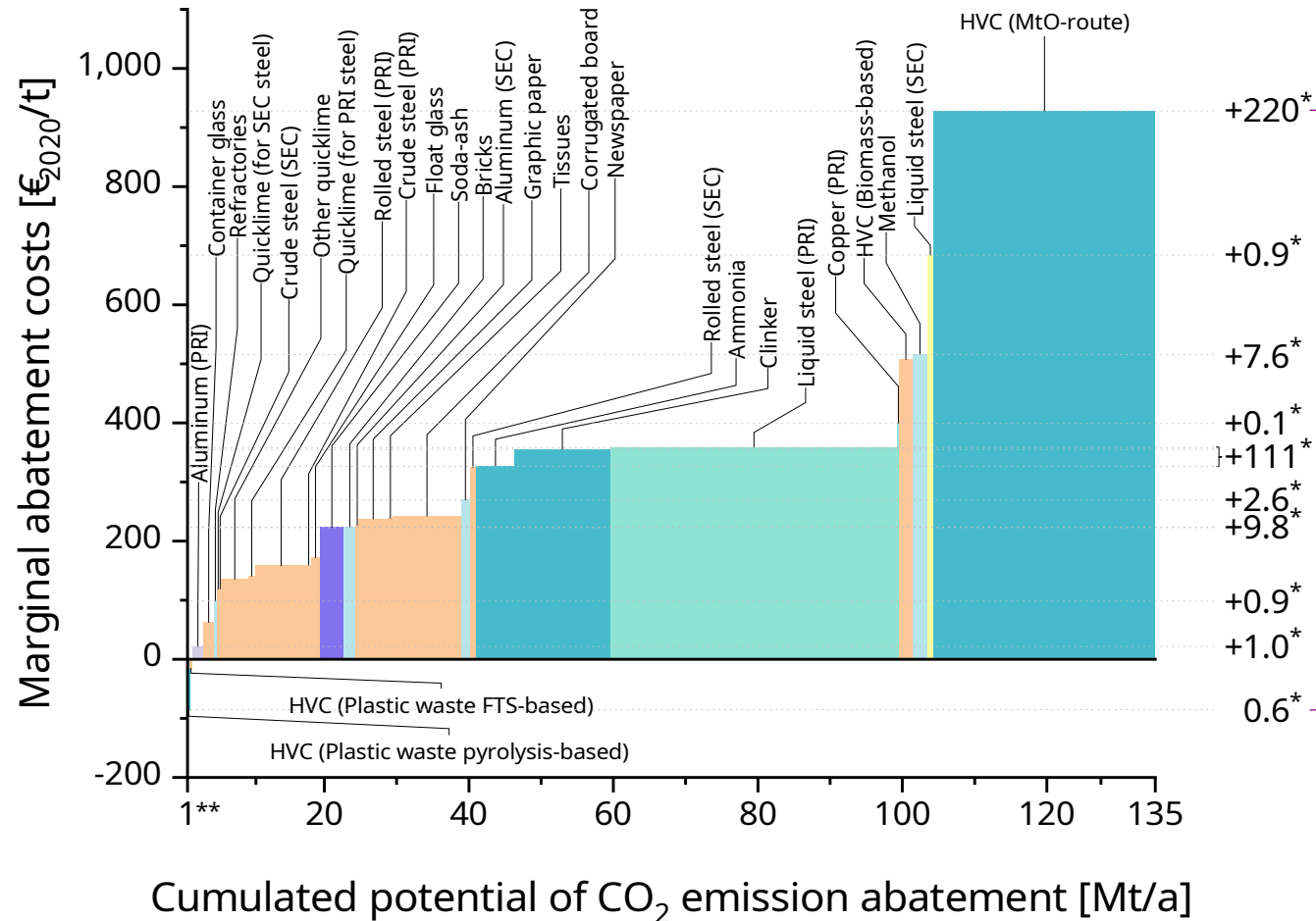
- Für das Jahr 2035 ergibt sich ein Wasserstoffbedarf von 0 TWh bis 82 TWh.
- Zusätzliche Nachfrage kann sich z.B. aus Pilotprojekten oder aufgrund von Subventionen ergeben.
- Wasserstoffbedarf ergibt sich im Jahr 2035 – außer in einem Szenario – lediglich für die Bereitstellung von Prozesswärme.
- 2045 bedarf das MtO-Verfahren 196 TWh.
- Weitere „No-Regret“-Einsatzzwecke sind die Ammoniak- sowie Methanolsynthesen (25 TWh) und die Produktion von Flüssigstahl (61 TWh).

- 1 Auswahl der Produktionssysteme
- 2 Definition von Referenz-Systemen
- 3 Festlegung des Szenariorahmens
- 4 Finden der effizienten Vermeidungsoption
- 5 Bestimmung der Energiebedarfe
- 6 Regionalisierung auf Standorte

Exemplary marginal CO₂ abatement cost curve

Merit-Order of the least-cost low-carbon options in 2035, assuming a H₂ price of 100 €₂₀₂₀/MWh

- 1 Selection of industries
- 2 Specification of the reference prod. systems
- 3 Definition of the scenario framework
- 4 Detection of the least-cost low-carbon option
- 5 Determination of the resulting H₂ demand

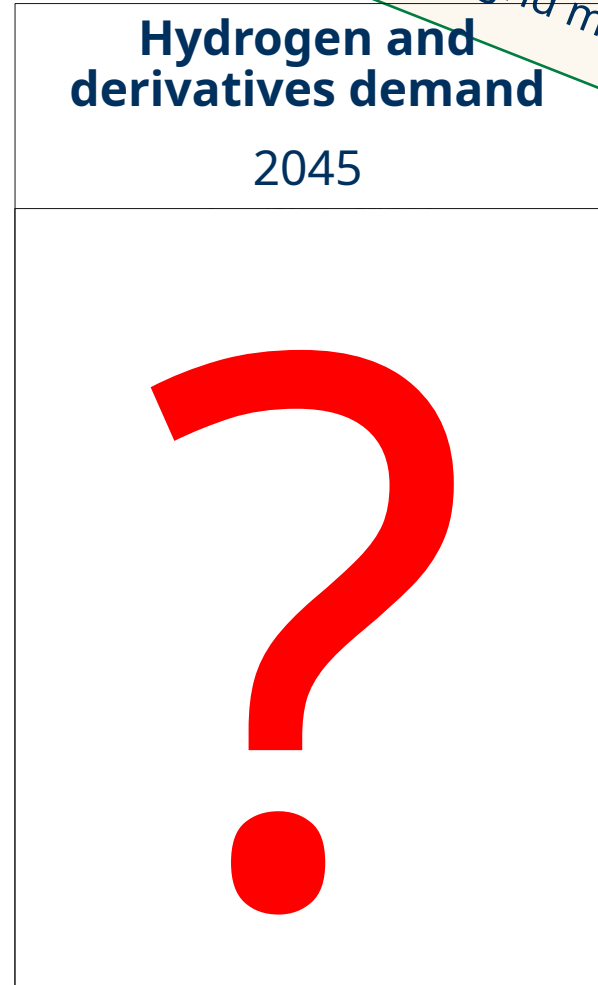
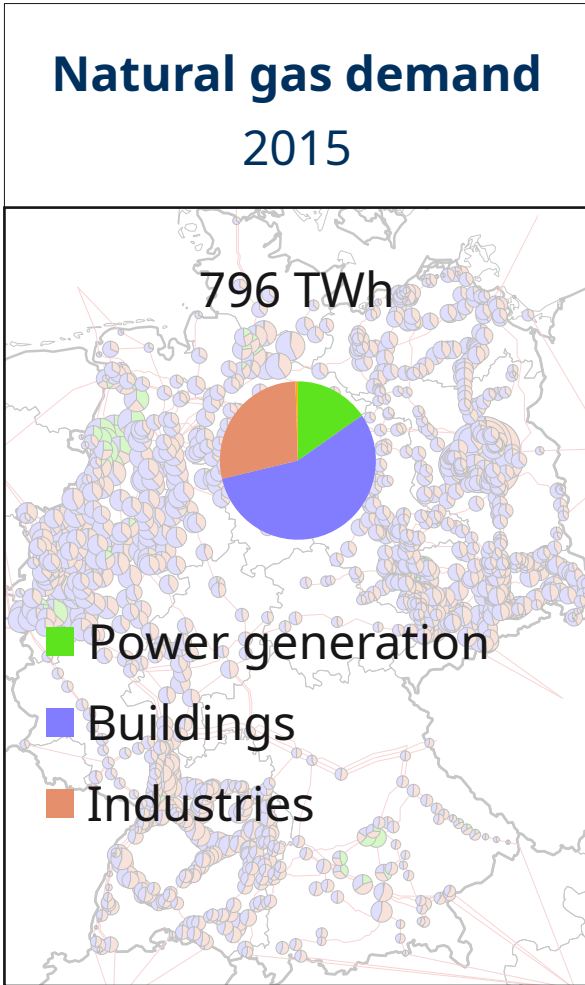


- A CO₂ price of 400 €₂₀₂₀/t would reduce industrial CO₂ emissions by 74 %.
- A CO₂ price of 300 €₂₀₂₀/t would reduce industrial CO₂ emissions by 29 %.
- HVC production via the MtO route has the highest abatement costs.
- H₂-based low-carbon options for providing process heat play a tangential role.

Final energy demand based on CO₂ abatement cost curves in or for energy system models

Scenario analyses: Which energy carrier demand will occur when and where?

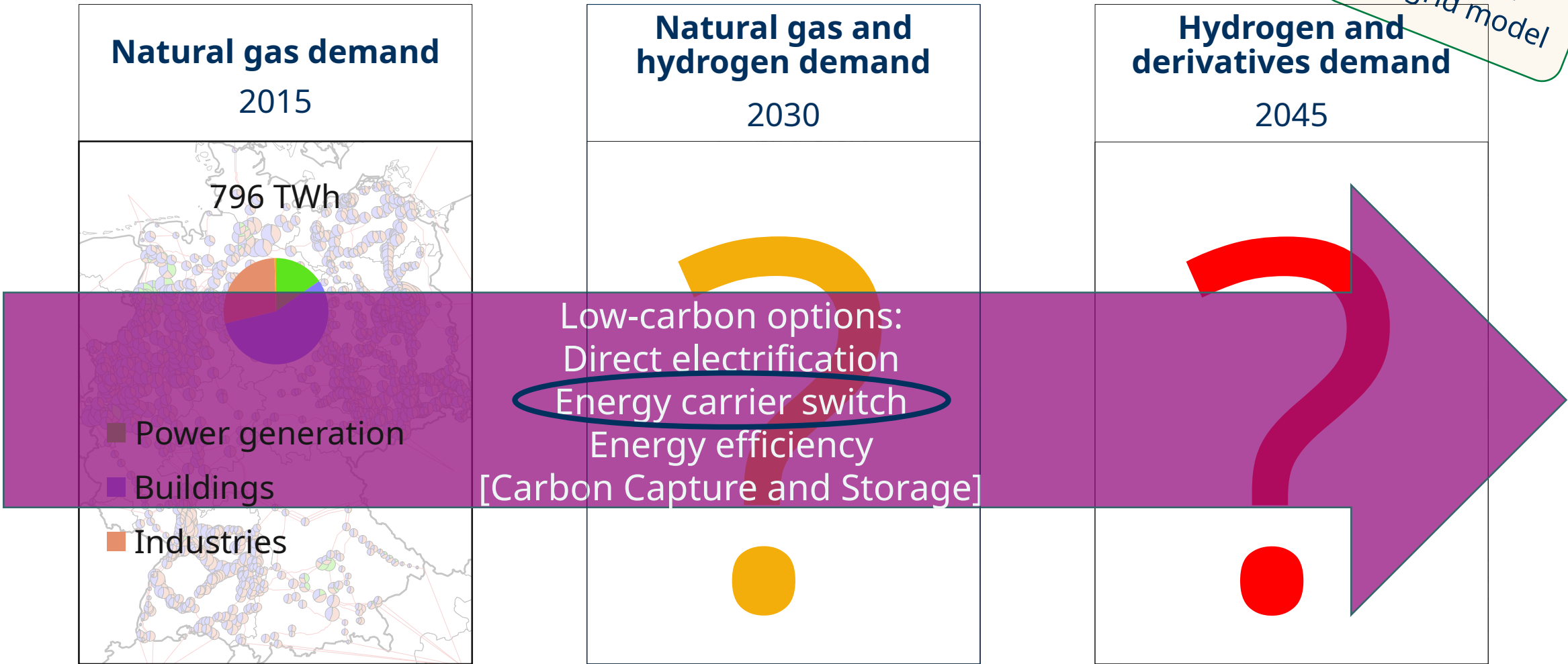
Example:
Gas grid model



Final energy demand based on CO₂ abatement cost curves in or for energy system models

Scenario analyses: Which energy carrier demand will occur when and where?

Example:
Gas grid model

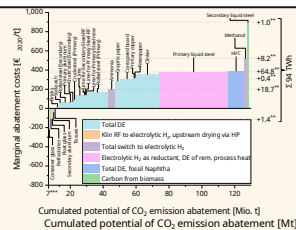


Next research steps

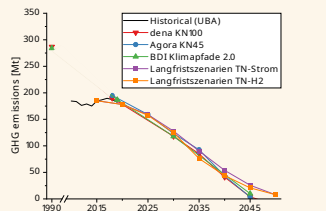
X

Data processing steps

1. Marginal abatement cost curves to prioritize low-carbon options

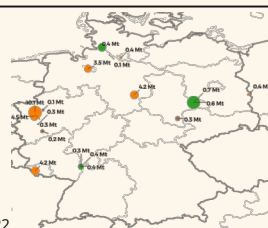


2. CO₂ budget of the industrial sector or CO₂ price



3. (Regional) production volumes

- Mt Methanol Various sources
- Mt Ammoniak Sources: VCI, EUTL, IRD
- Mt Rohstahl Source: Neuwirth et al. 2022

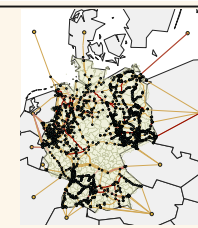


Example use of data

Transformation of EU ETS sectors (combined industrial and power market model)

Geographical distribution of electrolysis capacities (power grid model)

4. Gas grid transformation (gas grid model)



Other possible uses

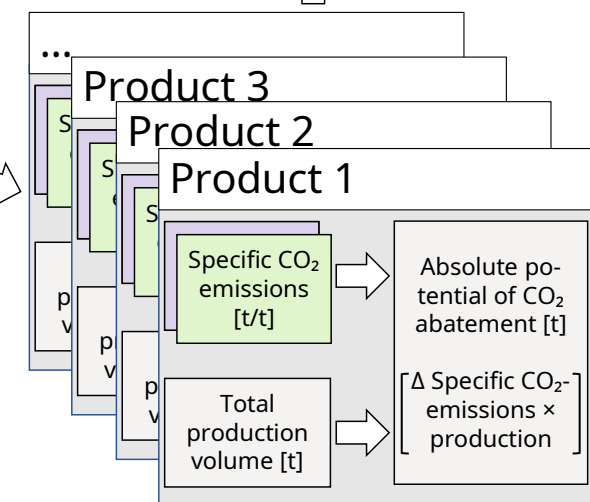
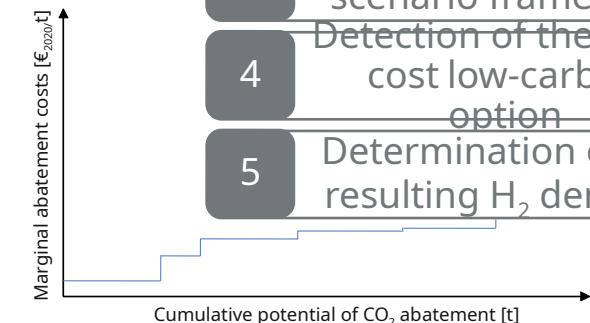
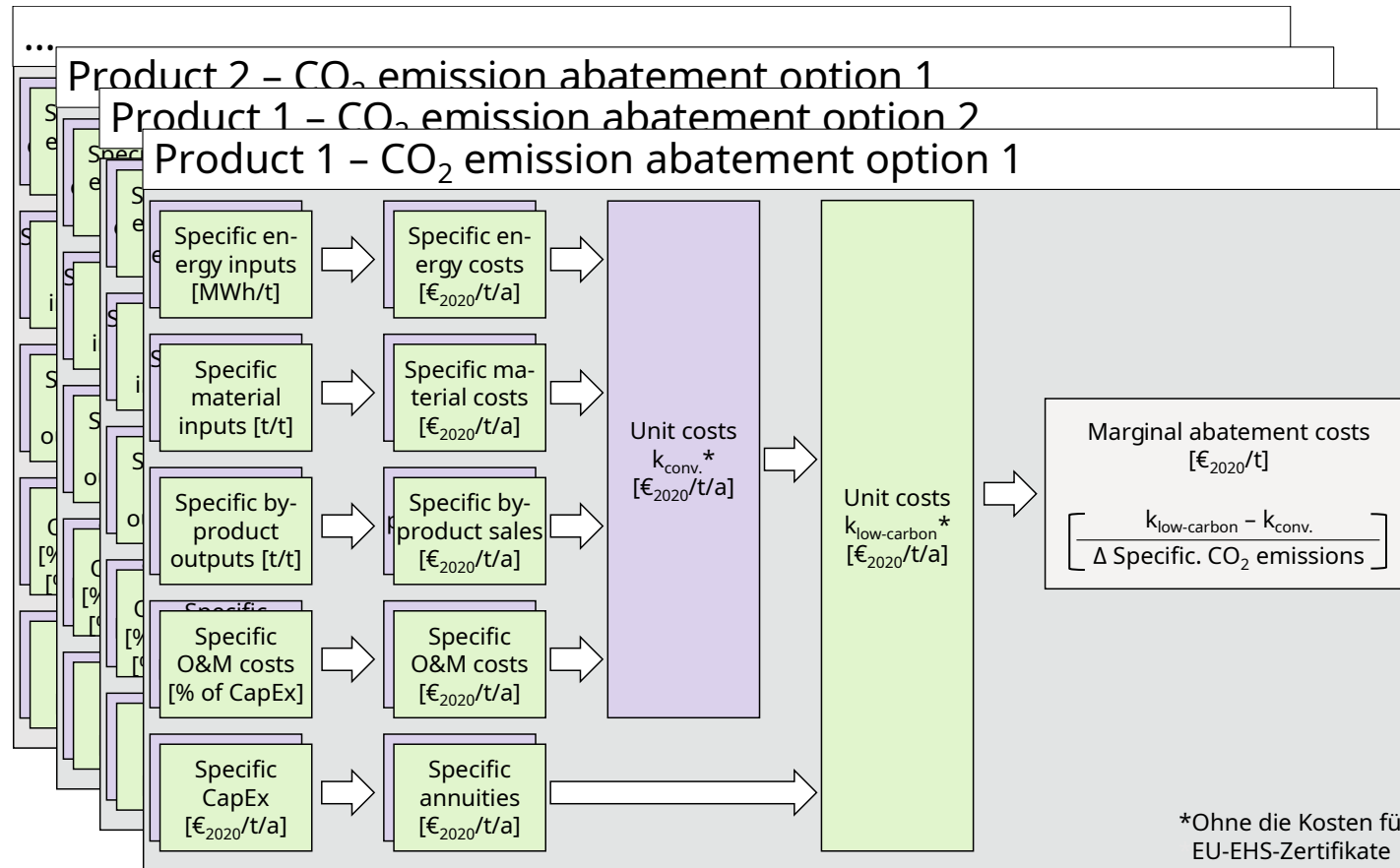
Planned approach

Scheme of the low-carbon options considered

Energy use as a reactant, a reductant or for process heat supply

- 1 Selection of industries
- 2 Specification of the reference prod. systems
- 3 Definition of the scenario framework
- 4 Detection of the least-cost low-carbon option
- 5 Determination of the resulting H₂ demand

Recherche (Literatur, Verbände, Presse etc.)



Szenarioannahmen

Discussion

Open issues and other research questions which deserve further attention

- Possible uses and benefits of the oxygen from the electrolysis
- Huge hydrogen requirements to replace fossil feedstock in the chemical industry
- Offshoring of parts of the value chain
- Regionalization of the national hydrogen demand to existing facilities
- Retrofitting existing gas pipelines or building new hydrogen pipelines