

Herausforderungen des Wasserstoffhochlaufs

Prof. Dr. Karsten Pinkwart

INHALT

- Wasserstoff
 - Deutsche Sichtweise
 - Europäische Sichtweise
 - Key Findings
 - Energieversorgung
 - Wasserstoff
 - Realitätscheck
- Kohlenstoffdioxid
 - Deutsche Sichtweise
 - Key Findings
 - Realitätscheck
- Zusammenfassung und Ausblick

Deutsche Sichtweise – Wie geht es der Stahlindustrie und was braucht sie?

Analyse der Entwicklung der deutschen Wirtschaftsweisen

Anhaltend schwierige Lage mit geringem Wachstum und hoher Unsicherheit, insbesondere durch geopolitische Spannungen und protektionistische US-Handelspolitik.

US-Zölle auf Stahl, Aluminium und Autos sowie mögliche Gegenzölle der EU verschlechtern die Exportchancen.

Energiepreise bleiben im internationalen Vergleich hoch und belasten die Wettbewerbsfähigkeit.

Ein Teil der energieintensiven Industrie, darunter auch die Stahlindustrie, scheint laut Gutachten dauerhaft verloren zu gehen.



Deutsche Sichtweise – Wie geht es der Stahlindustrie und was braucht sie?

Analyse der Entwicklung der deutschen Wirtschaftsweisen

Senkung der Energiepreise, insbesondere durch einen wirksamen CO₂-Preis, um die Transformation der Stahlindustrie zu ermöglichen und die Produktion zu halten.

Bürokratie, Fachkräftemangel und eine schrumpfende Erwerbsbevölkerung verschärfen die strukturellen Herausforderungen und hemmen Investitionen.

Anreize für Arbeit und qualifizierte Zuwanderung zu schaffen, um dem Arbeitskräftemangel entgegenzuwirken.

Transformation zur klimaneutralen Stahlproduktion bleibt notwendig, ist aber teuer und erfordert verlässliche politische Rahmenbedingungen.



Deutsche Sichtweise – Transformation der Stahlindustrie mithilfe von Wasserstoff

Kernaussagen und Empfehlungen der deutschen Wirtschaftsweisen

-  **Wasserstoff als Schlüssel zur Dekarbonisierung**
 - Ersatz klassischer Hochöfen durch H₂basierte Direktreduktionsanlagen
-  **Infrastruktur und Versorgungssicherheit**
 - verlässliche Lieferketten und Netzinfrastruktur
-  **Zielgerichtete Förderung statt Dauersubventionen**
 - Unterstützung erster Umbau- Investitionen
 - langfristig marktwirtschaftliche Behauptung
-  **Priorisierung schwer elektrifizierbarer Sektoren**
 - Fokus auf “No-regret”-Anwendungen wie Stahlherstellung statt auf breite Streuung (z. B. im Gebäudesektor)
-  **Koordination und Bürokratieabbau**
 - schnelle Genehmigungen, klare technologische Standards, rechtssichere Regelwerke



Europäische Sichtweise – Was ist gut am Wasserstoff?

A European Steel and Metals Action Plan

Wasserstoff wird als Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung der Stahl- und Metallindustrie hervorgehoben, insbesondere für die Direktreduktion von Eisenerz (DRI) als Alternative zu kohlebasierten Verfahren.

Der Aktionsplan betont die Notwendigkeit eines ausreichenden und bezahlbaren Angebots an erneuerbarem und kohlenstoffarmem Wasserstoff, um eine wettbewerbsfähige Transformation der Branche zu ermöglichen.

Die Europäische Kommission kündigt die Verabschiedung eines delegierten Rechtsakts zu den Grenzwerten und der Definition von kohlenstoffarmem Wasserstoff an, um Investitionssicherheit zu schaffen.



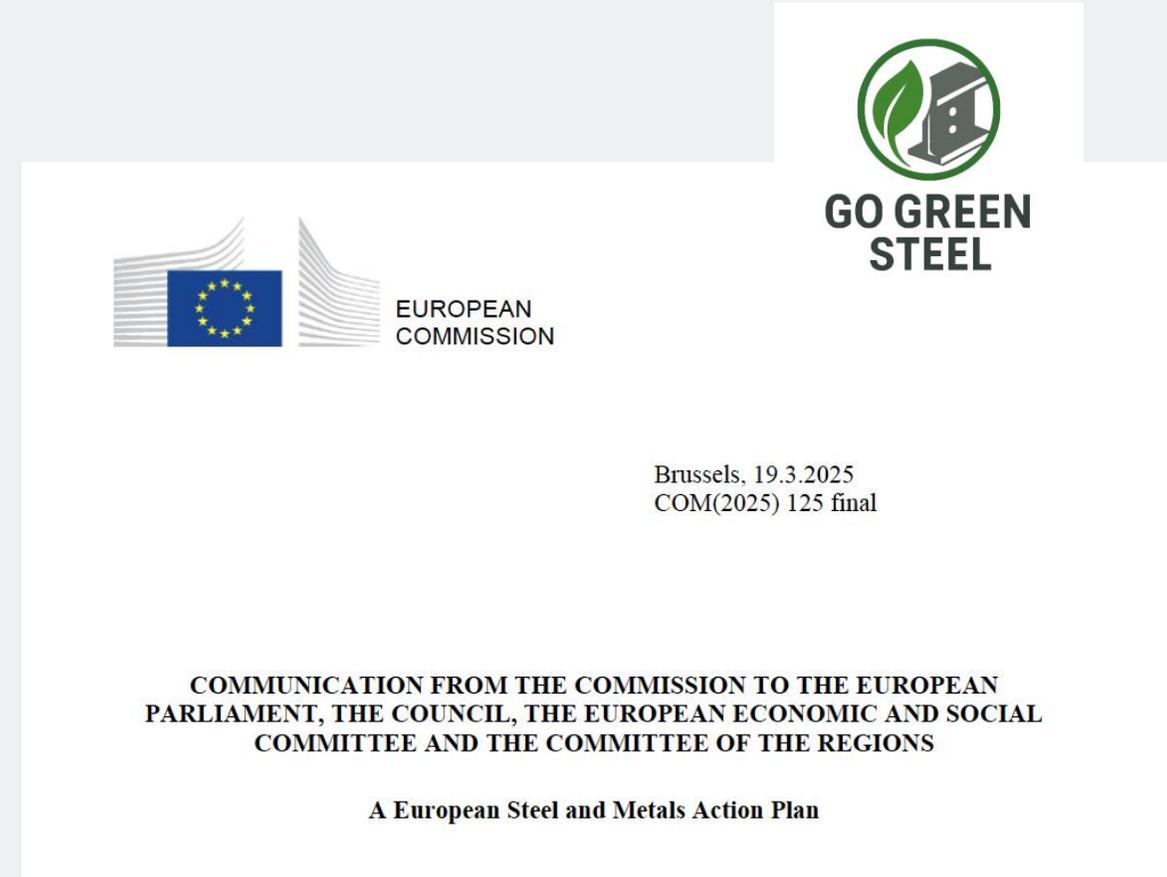
Europäische Sichtweise – Was ist gut am Wasserstoff?

A European Steel and Metals Action Plan

Die Förderung des Ausbaus von Wasserstoffinfrastruktur (z.B. Netzanbindung, Wasserstoffbank, Clean Hydrogen Alliance) wird als zentrale Maßnahme zur Unterstützung der Industrie genannt.

Wasserstoffbasierte Produktionswege sollen durch gezielte öffentliche Unterstützung und neue Beihilferegulungen (z.B. Contracts for Difference, Innovationsfonds) erleichtert werden.

Die Kommission will den Fokus der European Clean Hydrogen Alliance auf Sektoren legen, in denen Wasserstoff besonders relevant für die Dekarbonisierung ist (z.B. Stahl).



Europäische Sichtweise – Was ist gut am Wasserstoff?

A European Steel and Metals Action Plan

Die Transformation hin zu wasserstoffbasierter Produktion wird als kostenintensiv eingestuft; Metalle mit niedrigerem CO₂-Fußabdruck bleiben auf absehbare Zeit teurer als konventionell hergestellte Produkte.

Öffentliche Beschaffung und Leitmärkte sollen gezielt Nachfrage nach grünem Stahl und Metallen schaffen und so die Wirtschaftlichkeit wasserstoffbasierter Prozesse verbessern.

Die Kommission plant Maßnahmen zur Verkürzung der Wartezeiten für Netzanschlüsse und zur Beschleunigung des Zugangs zu sauberem Strom und Wasserstoff für die Industrie.

Die Rolle von Wasserstoff wird als komplementär zu anderen Dekarbonisierungstechnologien wie Elektrifizierung und Kreislaufwirtschaft betrachtet, aber als entscheidender Hebel für die primäre Stahlerzeugung hervorgehoben.



Key Findings - Energieversorgung

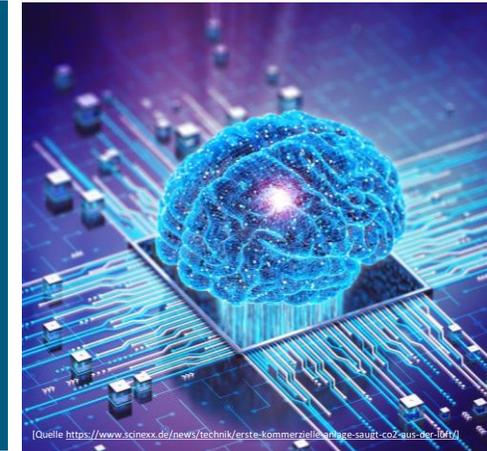
Treiber für den erwarteten globalen Anstieg des Energiebedarfs



Elektrifizierung + steigender Energiebedarf in Schwellen- und Entwicklungs-ländern



H₂ - basierte Energieträger und chemische Rohstoffe



Künstliche Intelligenz, Cybersicherheit, Gaming, Kryptowährungen, hum. Roboter



Zunehmender Einsatz für Meerwasserentsalzung



Negative Emissionstechnologien, direkte CO₂-Entnahme aus der Luft



Weltraummissionen, Raumstationen, Marsmission

Key Findings - Energieversorgung

Schlüsselbausteine des zukünftigen Energiesystems



Key Findings - Energieversorgung

Schlüsselbausteine des zukünftigen Energiesystems

1

Strom wird zur wichtigsten Primärenergie
Starker Anstieg der Stromnachfrage weltweit



2

Erneuerbare Energien dominieren die Stromerzeugung
Sonne und Wind wichtigste Quellen



Katherina Reiche am 26.04.2025:
„Jede Kilowattstunde wird zur strategischen Ressource“

Biomasse, Geothermie und Solarthermie hauptsächlich für Wärmesektor



5

Grüne Moleküle als global handelbare Güter
Klimaneutrale Energieträger und Chemierohstoffe



6

Ressourcenbedarf als Herausforderung
Notwendigkeit geschlossener Stoffkreisläufe



Key Findings - Energieversorgung

Schlüsselbausteine des zukünftigen Energiesystems



Key Findings – Wasserstoff

Wer treibt uns an in Deutschland?

Anwendungen und Anwender in den Sektoren

Industrie



- Stahlindustrie
- Raffinerien
- Chemische Industrie
- Zementindustrie
- Papierindustrie

Mobilität



- Schwere Fahrzeuge
- Luft- und Schifffahrt
- Individualmobilität
- Sonderfahrzeuge

Stromerzeugung / Gebäude



- Strombereitstellung
- Wärme- und Fernwärmebereitstellung

Key Findings - Wasserstoff

Nationale Wasserstoffstrategie

2020-06-10

2021-09-22

2022-05-17

2023-07-26



Key Findings - Wasserstoff

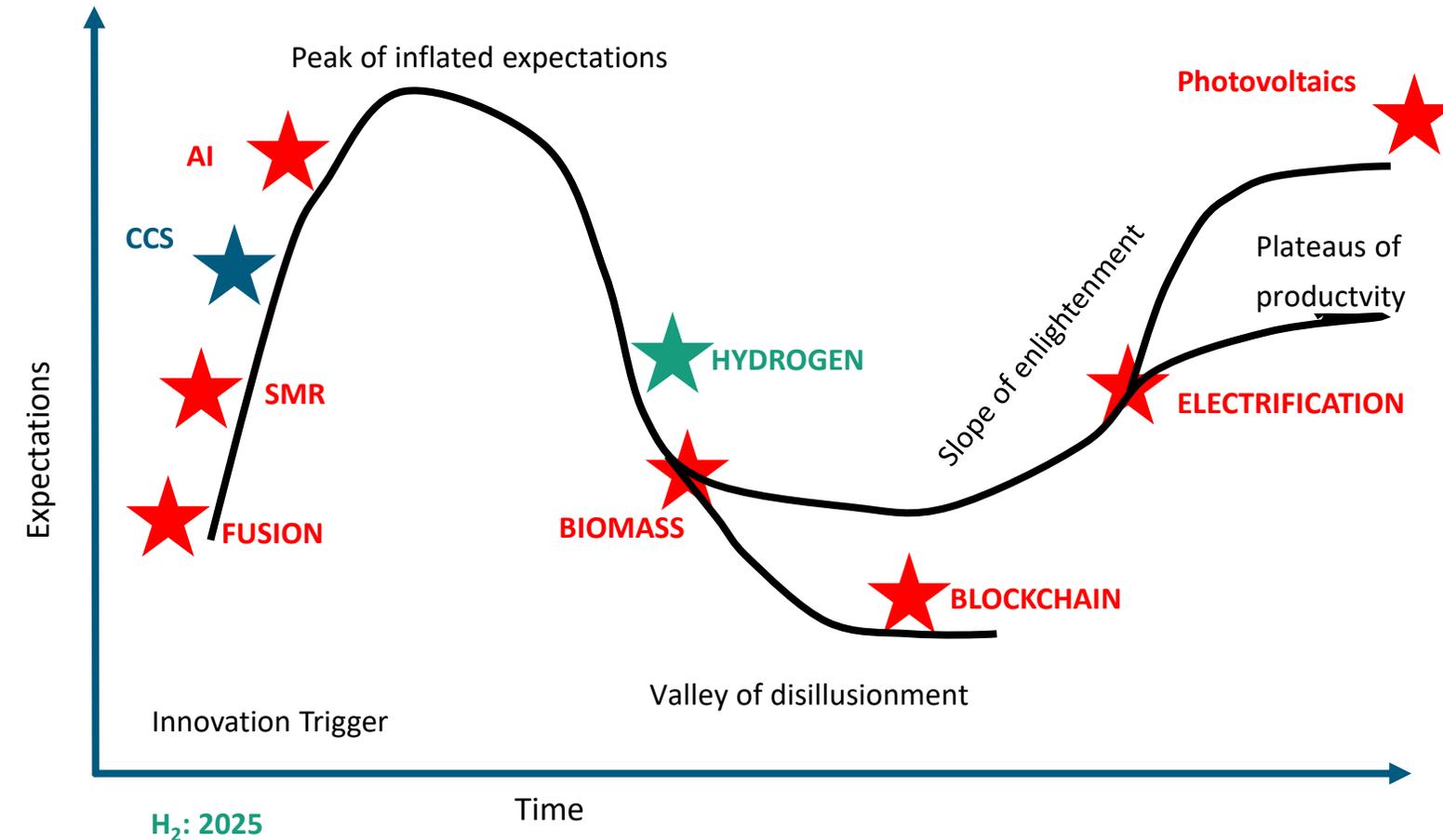
Nationaler Wasserstoffrat

- 2025 - heute
 - Sicherheitskultur im Wasserstoffhochlauf
 - Wasserstoff im straßengebundenen Verkehr
 - FuE-Bedarfe Wasserelektrolyse
 - Wasserstoffhochlauf stärken
 - Clean Industrial Deal – trilaterale Stellungnahme
 - ...
- 2024
 - Systemdienliche Elektrolyse
 - Wasserstoffhochlauf in Gefahr
 - RED III (Industriequote)
 - Midstream
 - ...



Key Findings - Wasserstoff

Gartner Hype Cycles in Energy Transformation



■ Innovation Trigger:

Technischer Durchbruch erregt Aufmerksamkeit,
Phase der Anschubfinanzierung, Start-ups

■ Peak of inflated expectations:

Erste Anwendungen auf dem Markt, enormer
Medienhype, viele Unbekannte

■ Valley of disillusionment:

Enttäuschung aufgrund gebrochener Versprechen,
Rückzug der Technologie

■ Slope of enlightenment

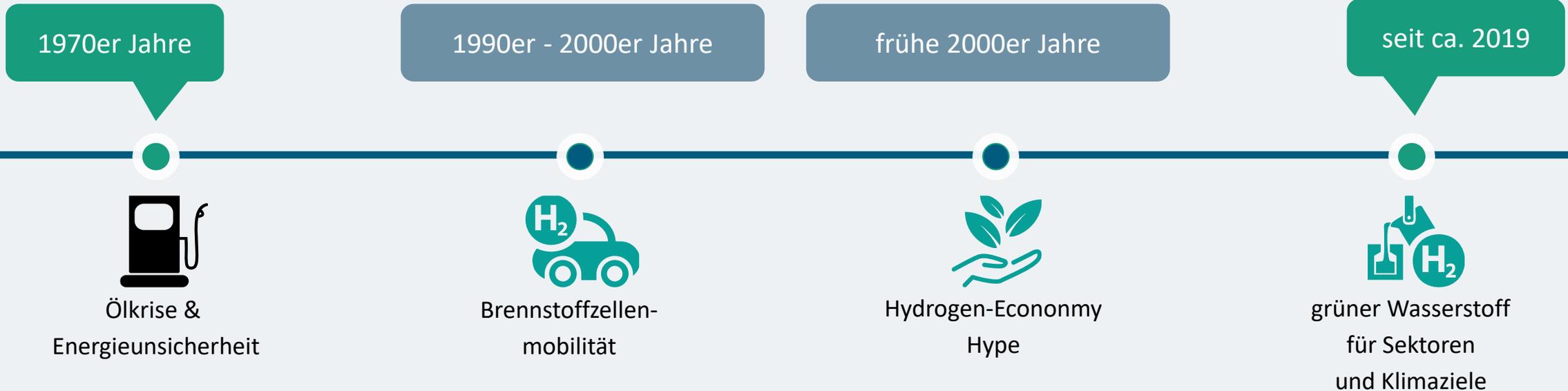
Kritische Probleme gelöst, Investitionen, First Movers
entweder reich oder insolvent

■ Plateaus of productivity:

Breite Akzeptanz, bestehende Anwendungen und
Geschäftsmodelle, langfristige Stabilität, Einfluss auf
Gesellschaft und Wirtschaft

Key Findings - Wasserstoff

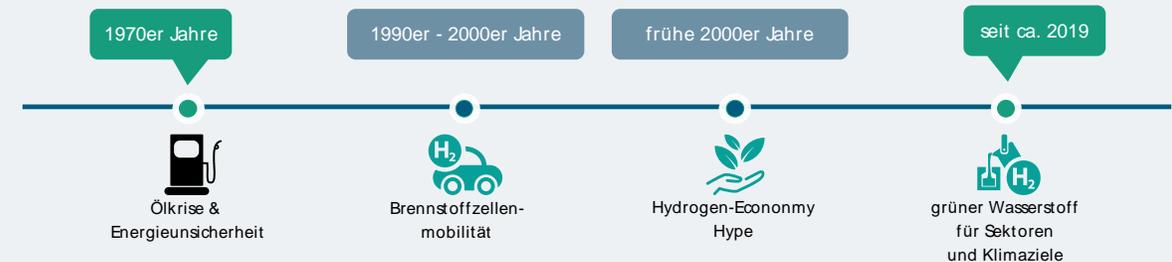
Hypes der vergangenen Jahrzehnte



Key Findings - Wasserstoff

Hypes der vergangenen Jahrzehnte

- **vergangene Jahrzehnte**
 - mehrere Wasserstoff-Hypes mit großen Erwartungen an die Technologie
 - gefolgt von Enttäuschung oder einem Realitätscheck
- **aktueller Zeitraum**
 - preiswerter EEG – Strom
 - Klimaziele -> Wasserstoff oder klimaneutraler Umgang mit Kohlenstoffdioxid
- **Besonderheit**
 - Marktbereitung für H₂ und / oder CO₂ unter laufendem Betrieb
 - Wettbewerb mit fossilen Energieträgern



Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck - H₂ Indexpreise

Zeitraum	grüner Wasserstoff (€/kg)	grauer Wasserstoff (€/kg)	Status
Januar 2023	~9,16	~6,30	<ul style="list-style-type: none"> • THG – Quoten greifen im Mobilitätssektor
Oktober 2023	11,00 (an einigen Tankstellen)	13,85–15,25 (an Tankstellen)	<ul style="list-style-type: none"> • H2 Mobility stellt auf neues Preismodell um
Februar–März 2025	3,87–6,36 (Bandbreite)	2,06–2,31	<ul style="list-style-type: none"> • Preise für fossilen Wasserstoff sinken deutlich, getrieben durch fallende Erdgaspreise.
Mai 2025	5,42 (Wochenmittel)	2,06–2,31	<ul style="list-style-type: none"> • Durchbrüche in der Wasserstofftechnologie • Preise steigen wieder, beeinflusst durch gestiegene Nachfrage, saisonale Effekte und höhere Energiepreise.

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Deutlich höhere Kosten und Marktpreise für grünen Wasserstoff

Hohe Produktionskosten

- stark abhängig vom Strompreis

Fehlende Skaleneffekte

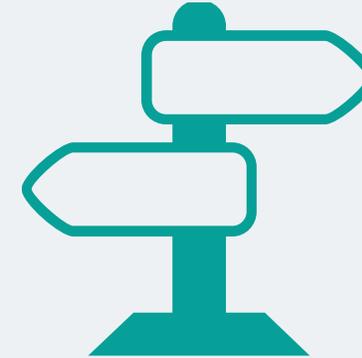
- Produktion steht noch am Anfang der industriellen Skalierung
- geringe Anlagenauslastung, hohe Kapitalkosten und lange Genehmigungsprozesse
- fehlende Midstream-Akteure

Globale Unsicherheiten

- Verzögerungen bei Importprojekten
- instabile geopolitische Lage führen zu Versorgungssorgen

Hohe Infrastrukturkosten

- Aufbau von Wasserstoffleitungen, Speicher- und Verteilnetzen ist teuer und langsam – erhöht die Lieferkosten



Zeitraum	grüner Wasserstoff (€/kg)	grauer Wasserstoff (€/kg)	Status
Januar 2023	~9,16	~6,30	• THG – Quoten greifen im Mobilitätssektor
Oktober 2023	11,00 (an einigen Tankstellen)	13,85–15,25 (an Tankstellen)	• H2 Mobility stellt auf neues Preismodell um
Februar–März 2025	3,87–6,36 (Bandbreite)	2,06–2,31	• Preise für fossilen Wasserstoff sinken deutlich, getrieben durch fallende Erdgaspreise.
Mai 2025	5,42 (Wochenmittel)	2,06–2,31	• Durchbrüche in der Wasserstofftechnologie • Preise steigen wieder, beeinflusst durch gestiegene Nachfrage, saisonale Effekte und höhere Energiepreise.

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Ein verlässlicher und kohärenter Regulierungsrahmen ist entscheidend für Investitionen in den Wasserstoffmarkt, doch fehlende EU-weite Abstimmung und regulatorische Lücken behindern derzeit eine effiziente Marktentwicklung.

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Die Serienfertigung von Elektrolyseuren nach dem Vorbild der Automobilindustrie ist zentral für günstigen grünen Wasserstoff – daran arbeiten führende Hersteller und Forschungspartner.

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Zertifizierung und Standards
 - Der Nationale Wasserstoffrat fordert Zertifizierungsregeln für grünen und CO₂-armen Wasserstoff, die acht zentralen Anforderungen erfüllen – von Klimaintegrität bis hin zu internationaler Anschlussfähigkeit und fairen Wettbewerbsbedingungen.

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Regionaler Markthochlauf
 - Regionale Wasserstoffhubs wirken als Katalysatoren für den Markthochlauf durch praxisnahe Erprobung und Umsetzung von Wasserstoffanwendungen.

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
 - Die European Hydrogen Bank und nationale Instrumente wie CCfDs fördern erneuerbaren Wasserstoff, indem sie Kostendifferenzen ausgleichen und Investitionssicherheit durch langfristige Zusagen schaffen.

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Infrastrukturentwicklung
 - Eine leistungsfähige Wasserstoffinfrastruktur ist Grundvoraussetzung für einen funktionierenden Markt – bis 2028 sollen über 6.000 Kilometer Leitungen in Deutschland und Europa entstehen.

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
 - Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft muss eng mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und der Integration in Strom- und Speicherinfrastruktur abgestimmt werden.

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Rascher Aufbau eines internationalen Wasserstoffmarkts nach Gasmarkt-Vorbild mit klaren Investitionszielen, schneller Infrastrukturentwicklung und verlässlicher Regulierung.

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Internationale Dimension
 - Die europäische Wasserstoffstrategie stützt sich auf die seit 2020 bestehende European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative, in der 31 Infrastrukturbetreiber eine paneuropäische Wasserstofftransportinfrastruktur zur Angleichung regionaler Angebot-Nachfrage-Unterschiede anstreben.

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
 - Wasserstoff vorrangig dort fördern, wo er zur Dekarbonisierung unerlässlich ist – etwa in der Stahl- und Chemieindustrie .

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Strenge Qualitätskriterien
- Die RED III schreibt vor, dass bis 2030 42 % und bis 2035 60 % des industriell genutzten Wasserstoffs aus erneuerbaren Quellen stammen müssen, während 16 europäische Verbände einen pragmatischeren, technologieneutralen Ansatz fordern, um kostengünstigen Wasserstoff zu ermöglichen. von Ambitionen und Realität

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards

Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf

Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension

Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Balancierung von Ambitionen und Realität
- Der H2-Marktindex 2024 liegt mit 44 im neutralen Bereich, wobei Marktakteure übermäßige und inkohärente Regulierung sowie regulatorische Lücken als zentrale Hindernisse für den Wasserstoffmarkthochlauf sehen.

Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Schaffung der Grundlagen

- Regulatorischer Rahmen
- Technologieentwicklung und Produktionskapazitäten
- Zertifizierung und Standards



Initiierung des Marktaufbaus

- Förderinstrumente und Finanzierung
- Infrastrukturentwicklung
- Regionaler Markthochlauf



Adressierung des breiteren Rahmens

- Integration in das Energiesystem
- Koordination von Angebot und Nachfrage
- Internationale Dimension



Restriktive Ansätze bei der Marktentwicklung

- Priorisierung von Anwendungsfeldern
- Strenge Qualitätskriterien
- Balancierung von Ambitionen und Realität

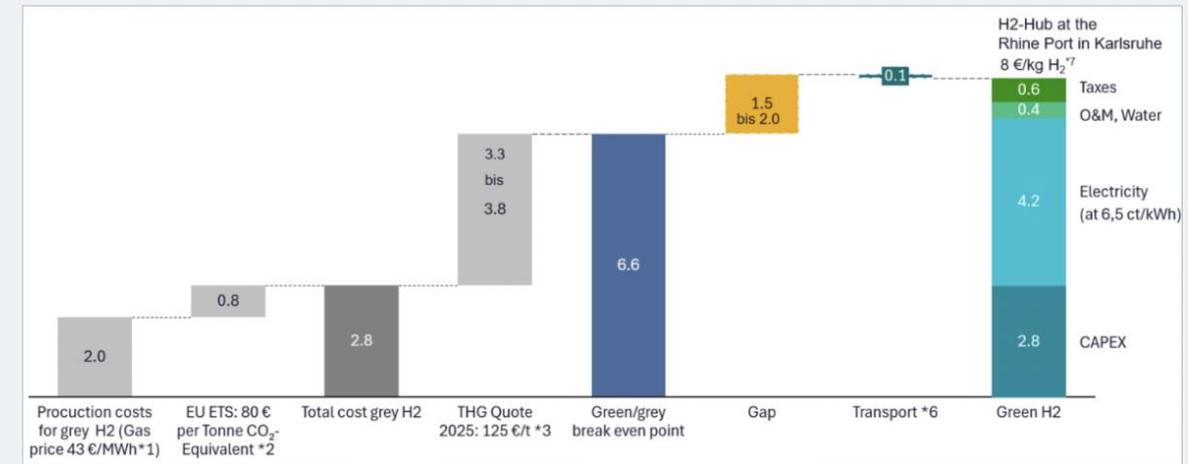


Key Findings – Wasserstoff am Markt der Energieträger

Realitätscheck

Deutlich höhere Kosten und Marktpreise für grünen Wasserstoff -> Kostenlücken

- Klimaschutzverträge
- privilegierte Umlagen
- direkte Umlagen
 - Steuer
 - Quotenmodelle
- Langfristverträge
 - öffentliche Haushalte
 - Quotenmodelle -> Volatilität von Cashflows verringern und Planungssicherheit schaffen
- Absicherung von Fristen- und Mengentransformationen
 - öffentliche Haushalte
 - Versicherungslösungen
 - Mischformen



[Quelle: Siemens Energy]

Deutsche Sichtweise – Was braucht die Stahlindustrie?

Die Antwort der Politik - Koalitionsvertrag 2025

"Die Stahlindustrie ist von zentraler strategischer Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland."

„ Wir werden sie erhalten und zukunftsfähig machen und sie bei ihrer Umstellung der Produktionsprozesse auf dem Weg zur Klimaneutralität unterstützen.“

„ Dazu wollen wir ihr auch die Nutzung von CCS-Technologien ermöglichen. Auch das konsequente Recycling von Stahlschrott kann kurzfristig stark zur Dekarbonisierung beitragen und bedarf daher entsprechender Unterstützung.“

„ Die Bundesregierung wird sich für eine effektive Nachfolgelösung für die 2026 auslaufenden EU176 Safeguards einsetzen.“



Verantwortung für Deutschland

Koalitionsvertrag zwischen
CDU, CSU und SPD

21. Legislaturperiode

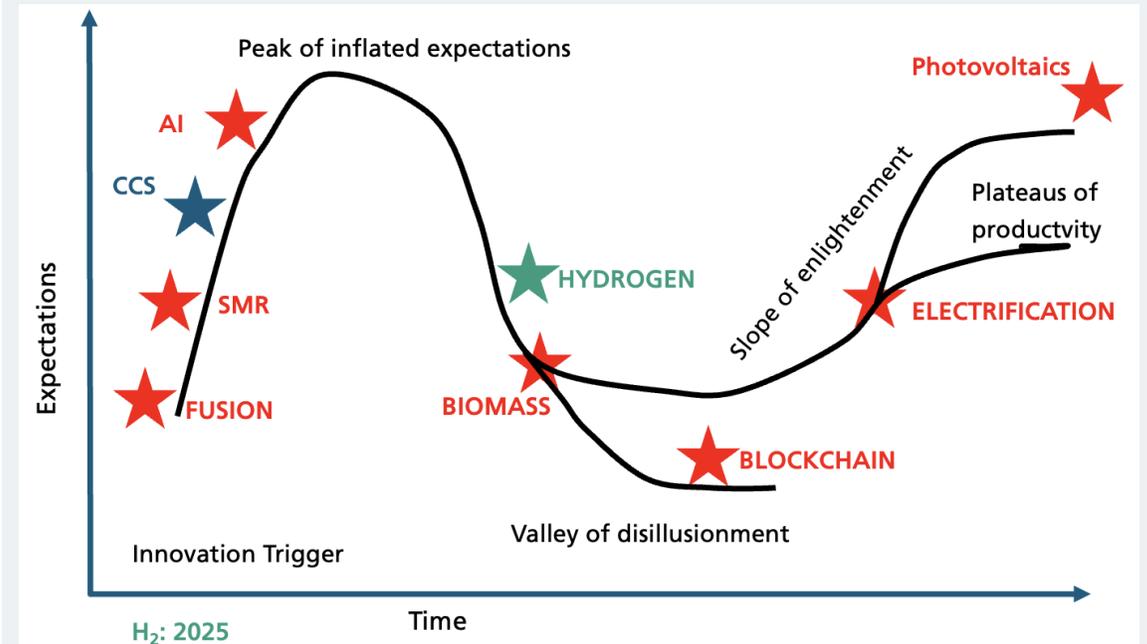
Führt ein Ausweg über CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung?

Die Antwort der Politik – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Bundeswirtschaftsministerin Katherina Reiche hat sich dafür ausgesprochen, möglichst bald Gesetzgebung zur CO₂-Abscheidung, CO₂-Speicherung und CO₂-Nutzung voranzubringen.

“Da müssen wir sehr schnell noch einmal in die Abstimmung gehen.“

- **Technologieoffenheit**
 - CCS/CCU
 - farbeneutraler Hochlauf von Wasserstoff
- **Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit**
 - Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Tragbarkeit
 - neue Gaskraftwerke und Reservekraftwerke
- **Kritik an Strompreisspitzen und Netzausbau**
 - Engpassmanagement
 - Überbauung von Netzverknüpfungspunkten
 - Prüfung der Kappung von Erzeugungsspitzen
- **Internationale Wettbewerbsfähigkeit**
 - planbare Strompreise
 - bessere Investitionsbedingungen



Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

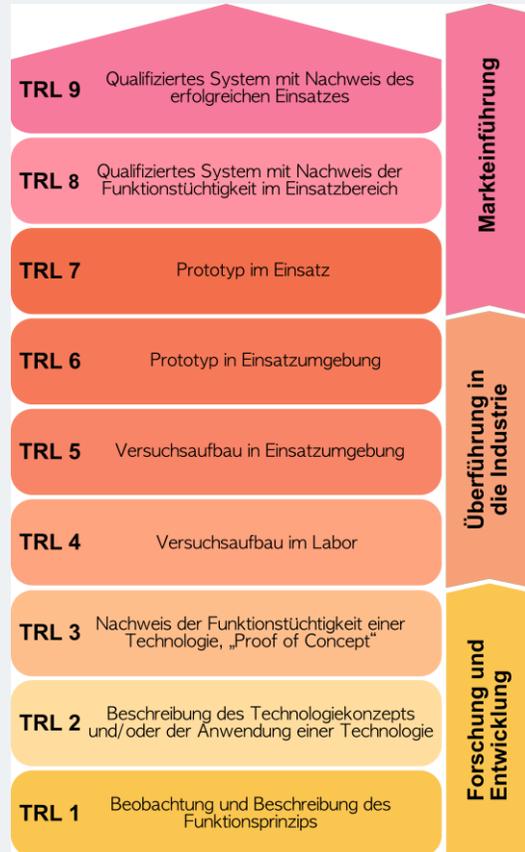
Realitätscheck



	Post-Combustion-Verfahren	Pre-Combustion-Verfahren	Oxyfuel-Verfahren	Membran-basierte Trenn-verfahren	Chemische Looping Combustion (CLC)	Adsorptions-verfahren	Kryogene CO ₂ -Abscheidung	Biogene Abscheidung	Hybrid-verfahren
Prinzip	Abtrennung nach der Verbrennung aus Rauchgasen (5–15 % CO ₂ -Anteil)	CO ₂ -Abtrennung vor der Verbrennung nach Brennstoffvergasung	Verbrennung mit reinem Sauerstoff (statt Luft), sodass Rauchgas hauptsächlich CO ₂ und H ₂ O enthält	Selektive Permeabilität von Membranen für CO ₂	Verbrennung mit Sauerstoffträgern (Metalloxide wie Fe ₂ O ₃ /NiO), die zwischen Reduktion (Brennstoff) und Oxidation (Luft) wechseln	CO ₂ -Adsorption an festen Materialien wie Zeolithen oder aktivierter Kohle	Verflüssigung von CO ₂ durch Abkühlung und Druck-erhöhung	CO ₂ -Bindung durch Algen oder Pflanzen via Photosynthese	Membranen + chemische Absorption oder Oxyfuel + Pre-Combustion
Besonderheiten / Vorteile	Nachrüstung bestehender Kraftwerke, Zement-industrie	Hohe CO ₂ -Konzentration (15–50 %) ermöglicht effiziente Abtrennung	Hoher Energiebedarf für Sauerstoff-produktion	Geringer Energiebedarf im Vergleich zu chemischen Verfahren	Innere CO ₂ -Separation ohne Energie für Gasaufbereitung	Kleine bis mittlere Gasströme, Biogas-aufbereitung	Sehr hohe Reinheit (≥99 %) des abgeschie-denen CO ₂		Steigerung der Effizienz und Senkung der Kosten durch Synergien

Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck



	Post-Combustion-Verfahren	Pre-Combustion-Verfahren	Oxyfuel-Verfahren	Membranbasierte Trennverfahren	Chemische Looping Combustion (CLC)	Adsorptionsverfahren	Kryogene CO ₂ -Abscheidung	Biogene Abscheidung	Hybridverfahren
Prinzip	Abtrennung nach der Verbrennung aus Rauchgasen (5–15 % CO ₂ -Anteil)	CO ₂ -Abtrennung vor der Verbrennung nach Brennstoffvergasung	Verbrennung mit reinem Sauerstoff (statt Luft), sodass Rauchgas hauptsächlich CO ₂ und H ₂ O enthält	Selektive Permeabilität von Membranen für CO ₂	Verbrennung mit Sauerstoffträger (Metalloxide wie Fe ₃ O ₄ /NiO), die zwischen Reduktion (Brennstoff) und Oxidation (Luft) wechseln	CO ₂ -Adsorption an festen Materialien wie Zeolithen oder aktivierter Kohle	Verflüssigung von CO ₂ durch Abkühlung und Druck-erhöhung	CO ₂ -Bindung durch Algen oder Pflanzen via Photosynthese	Membranen + chemische Absorption oder Oxyfuel + Pre-Combustion
Besonderheiten / Vorteile	Nachrüstung bestehender Kraftwerke, Zement-industrie	Hohe CO ₂ -Konzentration (15–50 %) ermöglicht effiziente Abtrennung	Hoher Energiebedarf für Sauerstoffproduktion	Geringer Energiebedarf im Vergleich zu chemischen Verfahren	Innere CO ₂ -Separation ohne Energie für Gasaufbereitung	Kleine bis mittlere Gasströme, Biogas-aufbereitung	Sehr hohe Reinheit (>99 %) des abgeschiedenen CO ₂		Steigerung der Effizienz und Senkung der Kosten durch Synergien

Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck



	Post-Combustion-Verfahren	Pre-Combustion-Verfahren	Oxyfuel-Verfahren	Membran-basierte Trenn-verfahren	Chemische Looping Combustion (CLC)	Adsorptions-verfahren	Kryogene CO ₂ -Abscheidung	Biogene Abscheidung	Hybrid-verfahren
Prinzip	Abtrennung nach der Verbrennung aus Rauchgasen (5–15 % CO ₂ -Anteil)	CO ₂ -Abtrennung vor der Verbrennung nach Brennstoff-vergasung	Verbrennung mit reinem Sauerstoff (statt Luft), sodass Rauchgas hauptsächlich CO ₂ und H ₂ O enthält	Selektive Permeabilität von Membranen für CO ₂	Verbrennung mit Sauerstoff-trägern (Metalloxide wie Fe ₂ O ₃ /NiO), die zwischen Reduktion (Brennstoff) und Oxidation (Luft) wechseln	CO ₂ -Adsorption an festen Materialien wie Zeolithen oder aktivierter Kohle	Verflüssigung von CO ₂ durch Abkühlung und Druck-erhöhung	CO ₂ -Bindung durch Algen oder Pflanzen via Photosynthese	Membranen + chemische Absorption oder Oxyfuel + Pre-Combustion
Besonderheiten / Vorteile	Nachrüstung bestehender Kraftwerke, Zement-industrie	Hohe CO ₂ -Konzentration (15–50 %) ermöglicht effiziente Abtrennung	Hoher Energiebedarf für Sauerstoff-produktion	Geringer Energiebedarf im Vergleich zu chemischen Verfahren	Innere CO ₂ -Separation ohne Energie für Gasaufbereitung	Kleine bis mittlere Gasströme, Biogas-aufbereitung	Sehr hohe Reinheit (≥99 %) des abgeschie-denen CO ₂		Steigerung der Effizienz und Senkung der Kosten durch Synergien
Technology Readiness Level (TRL)	9 Kraftwerk Petra Nova	9 etabliert in Gasauf-bereitungs-anlagen	6-8 Pilotprojekte in Zementwerken wie LEILAC; Retrofit-fähigkeit in Entwicklung	6-7 Pilotprojekte in Raffinerien und Biogasanlagen; Skalierungs-hürden	6-7 Pilotanlagen im MW-Bereich für Kraftwerke und Zementindustrie	8–9 kommerziell in Biogasauf-bereitung und Industrie-abgasen	6–7 Demon-strations-projekte in der Wasserstoff-produktion	8-9 Bioenergie mit Post-Combustion-Capture	5–7 für Algen-basierte Systeme

Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck

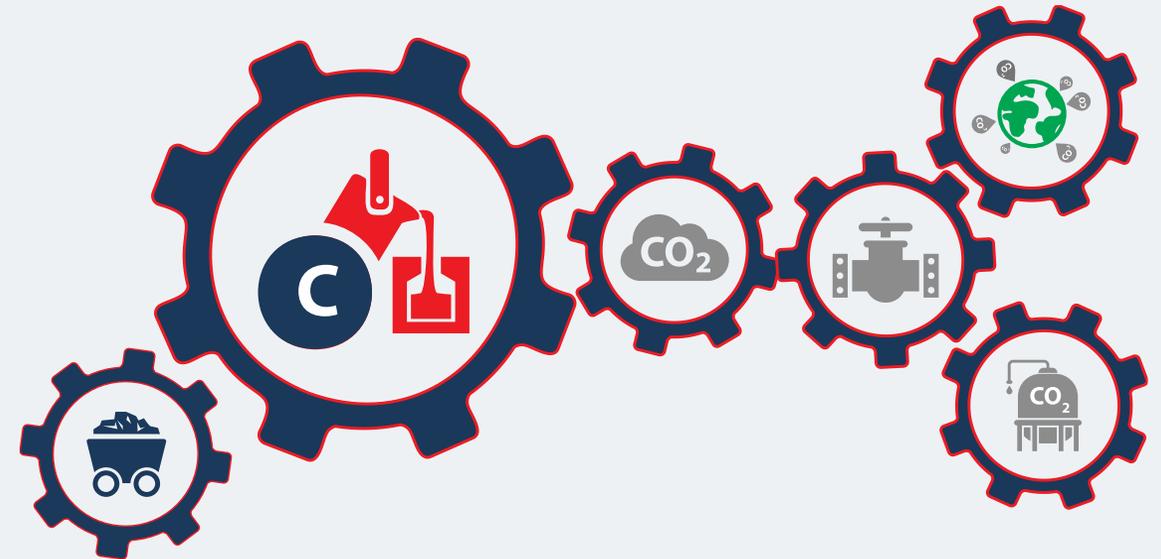


	Innovative Ansätze	Prinzip	TRL Level	Beispiele	Hemmnisse
Ansatz 1	Elektrochemische Abscheidung	Decoupled Redox Electrochemical Capture (DREC) symbiotische CO ₂ -Absorption und – Elektrolyse elektrochemische Membransysteme	4-5 6-7 7-8	Laborstab Absorptionseffizienzen von >99 % bei 10 mA/cm ² über 200 Stunden Pilotmodule im m ³ /h-Maßstab sind in Entwicklung Petra Nova - Pilotanlagen mit 60 Tonnen CO ₂ /Tag	Energiekosten hemmen (~50–150 kJ/mol vs. ~12 kJ/mol theoretisches Minimum) Materialdegradation (z. B. Membranverschleiß)
Ansatz 2	MOFs (Metal-Organic Frameworks)	Post-Combustion-Abscheidung mit MOFs Membranbasierte MOF-Systeme	6-7 4-5	Pilotanlagen 1–30 Tonnen CO ₂ /Tag keine ausreichende Skalierbarkeit für Industrieanlagen	MOF-Herstellung ist noch teuer (~50–200 €/kg) Skalierung: Projekte wie MOF4AIR (EU) und Svante zeigen Möglichkeiten
Ansatz 3	Direct Air Capture (DAC)	Abscheidung von CO ₂ aus Umgebungsluft	4-7	Orca (Island) Heirloom (USA)	Hohe Kosten und wirtschaftliche Unsicherheiten 230-450 US\$/t Energieintensität und Ressourcenbedarf 1000-2500 kWh/t

Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck

- Rechtlicher Rahmen
- Infrastruktur und Logistik
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierung
- Technologische Entwicklung
- Regulatorische Integration in Klimapolitik
- Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten

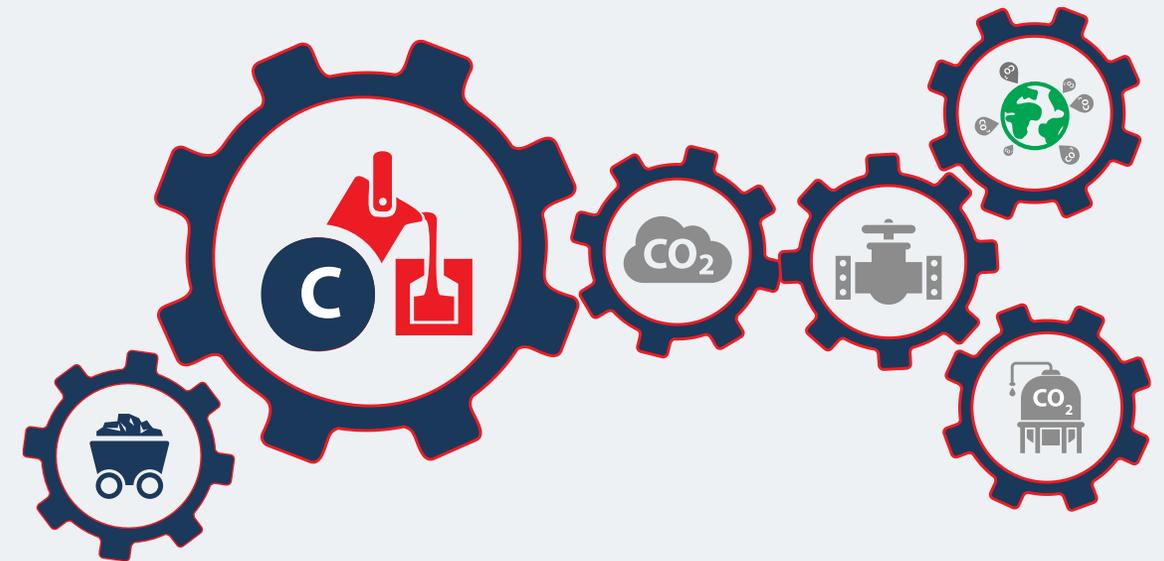


Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck



- **Rechtlicher Rahmen**
 - unklare bzw. uneinheitliche gesetzliche Regelungen auf EU- und nationaler Ebene
 - Genehmigungsverfahren für Speicherstandorte noch nicht standardisiert
 - Haftungsfragen bei langfristiger Speicherung (z. B. Leckagen)
- **Infrastruktur und Logistik**
- **Wirtschaftlichkeit und Finanzierung**
- **Technologische Entwicklung**
- **Regulatorische Integration in Klimapolitik**
- **Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten**

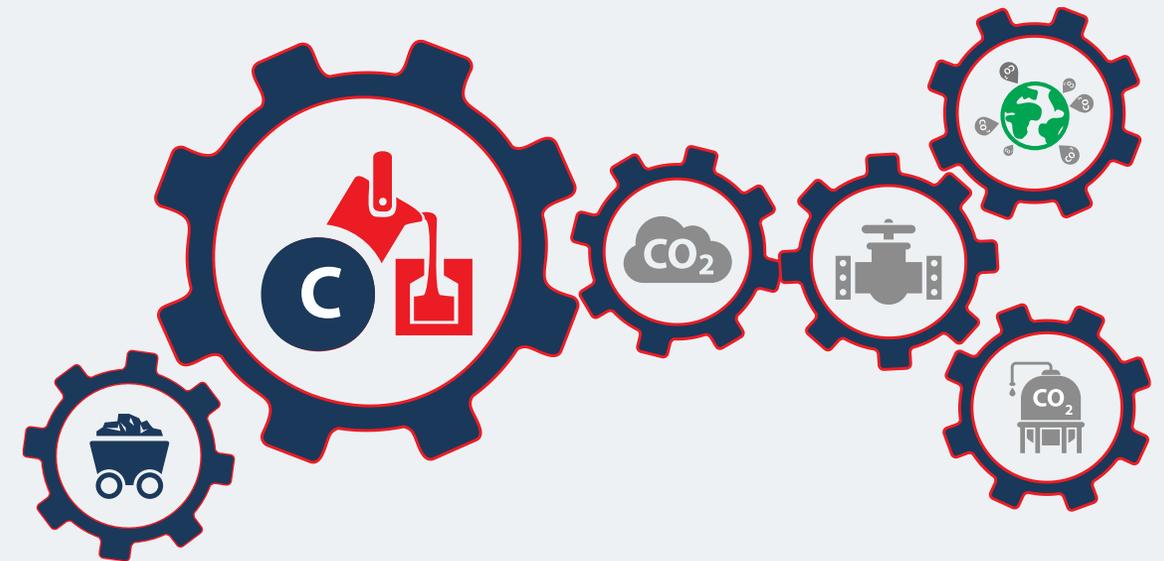


Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck



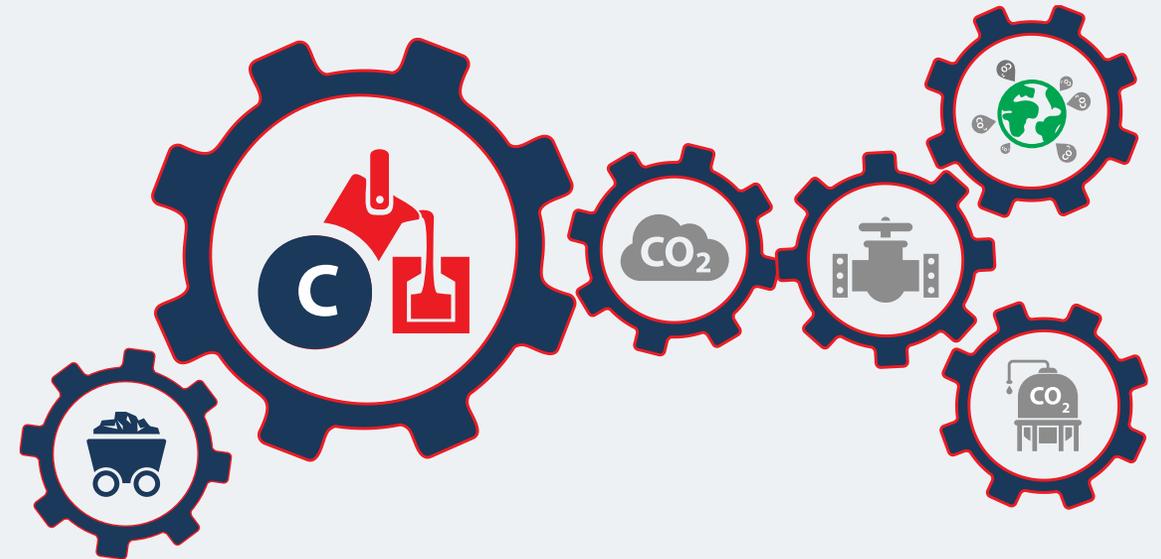
- Rechtlicher Rahmen
- Infrastruktur und Logistik
 - fehlende CO₂-Transportinfrastruktur (Pipelines, Häfen)
 - hoher Koordinationsbedarf beim grenzüberschreitenden Transport
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierung
- Technologische Entwicklung
- Regulatorische Integration in Klimapolitik
- Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten



Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck

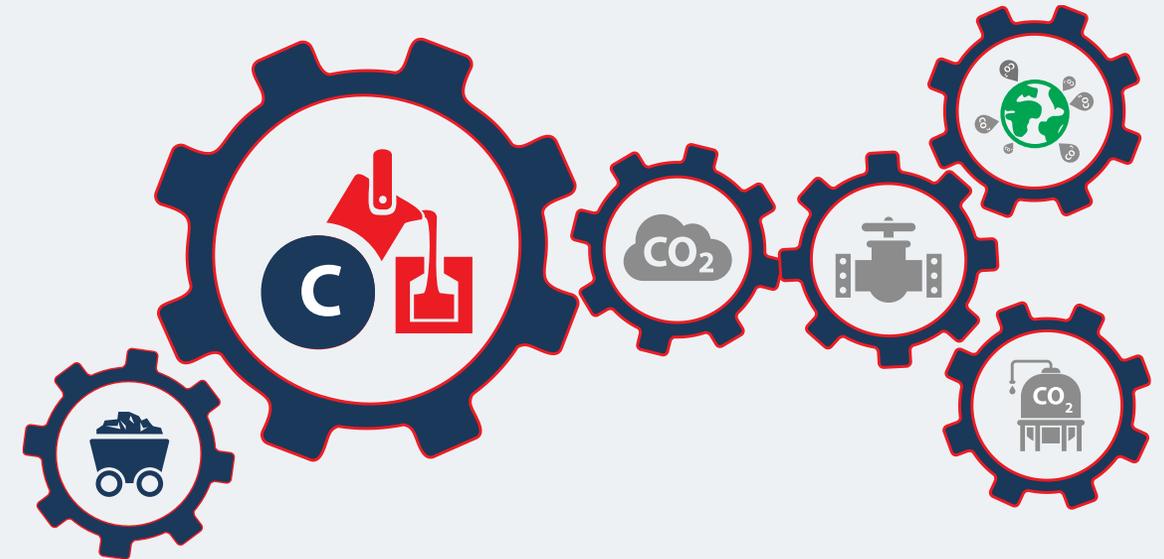
- Rechtlicher Rahmen
- Infrastruktur und Logistik
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierung
 - hohe Investitionskosten für Abscheidung, Transport und Speicherung
 - fehlende oder unzureichende Anreize/Marktmechanismen zur Kostendeckung
 - unklare Finanzierung für Pilot- und Großprojekte
- Technologische Entwicklung
- Regulatorische Integration in Klimapolitik
- Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten



Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

Realitätscheck

- Rechtlicher Rahmen
- Infrastruktur und Logistik
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierung
- Technologische Entwicklung
 - Effizienzsteigerung der Abscheidetechnologien notwendig
 - Skalierung vom Pilot- zum Industriemaßstab noch in der Entwicklung
 - langfristige Sicherheit und Überwachung von Speicherstätten
- Regulatorische Integration in Klimapolitik
- Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten



Key Findings – CO₂ - Abscheidung und CO₂ – Speicherung

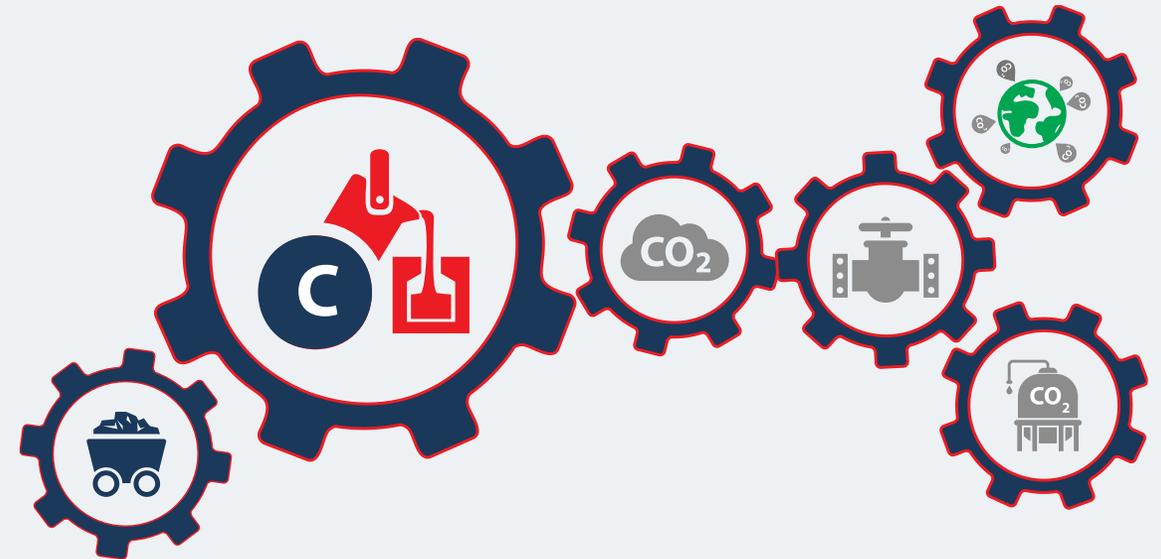
Realitätscheck



- Rechtlicher Rahmen
- Infrastruktur und Logistik
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierung
- Technologische Entwicklung

- Regulatorische Integration in Klimapolitik
 - Einbindung in Emissionshandelssysteme (EU ETS) noch begrenzt
 - Abgrenzung zu negativen Emissionen (z. B. BECCS) noch nicht abschließend geklärt

- Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten
 - Geologische Untersuchungen noch unvollständig
 - Wettbewerb um potenzielle Speicherflächen mit anderen Nutzungen



H₂ Wasserstoff VERSUS CO₂ Kohlenstoffdioxid

Vergleich

	Wasserstoff	Kohlenstoffdioxid
Ziel	Defossilisierung durch Ersatz fossiler Brennstoffe in Industrie, Energie, Verkehr	Abscheidung und dauerhafte Speicherung von CO ₂ aus Industrie und Energieerzeugung
Einsatzgebiete	Stahl-, Chemieindustrie, Schwerlastverkehr, Luft- und Schifffahrt, saisonale Energiespeicherung	Schwer zu dekarbonisierende Sektoren (z. B. Zement, Chemie, Gaskraftwerke)
Klimawirkung	Vermeidet CO ₂ -Emissionen durch Nutzung erneuerbarer Energie	Vermeidet Emissionen aus fossilen Quellen oder macht negative Emissionen möglich
Technologische Reife	Teilweise ausgereift, aber großskaliger Einsatz erfordert Infrastrukturaufbau	Technisch erprobt, aber wenig kommerziell umgesetzt
Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energiebedarf für Elektrolyse • Teurer Transport und Speicherung von Wasserstoff • Begrenzte Verfügbarkeit von grünem Strom 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende gesetzliche Rahmenbedingungen • Gesellschaftliche Akzeptanz (z. B. Speicherstandorte) • Langfristige Sicherheit der CO₂-Lager

Herausforderungen des Kohlenstoffdioxidhochlaufs

Zusammenfassung

- Langfristige Prognosen (bis 2045)
 - Capture
 - Anteil sinkt auf 60–75 % durch Skaleneffekte (z. B. CALF-20-MOFs) und günstigere Erneuerbare
 - Transport/Speicherung
 - Anteil steigt auf 25–40 % aufgrund komplexerer Logistik (z. B. cross-border Pipelines wie Northern Lights)
- **Kostenblock im CCS-Prozess**
 - 70–85 % CO₂-Abscheidung
 - 15–30 % Transport und Speicherung
- Für eine klimaneutrale Industrie sind jedoch integrierte Systeme entscheidend, die Abscheidung, Transport und Speicherung effizient verknüpfen.

Faktor	Einfluss auf Kostenverteilung	Beispiel
CO ₂ -Konzentration	Je verdünnter, desto höher Capture-Anteil	Zementwerke (15–25 % CO ₂) vs. Kohlekraftwerke (5–10 % CO ₂)
Infrastruktureife	Transportkosten sinken bei Skalierung	Nordsee-Pipelines: 3–6 €/t vs. neue Projekte in Osteuropa: 10–15 €/t
Regulatorische Hürden	Speicherkosten steigen bei Onshore- vs. Offshore-Lagerung	Deutschland: Offshore-Speicherung ab 2026, Onshore de facto verboten
Energiepreise	Stromkosten beeinflussen Capture anteilig	DAC-Anlagen: 60–80 % OPEX für Strom

Herausforderungen des Wasserstoffhochlaufs

Zusammenfassung

Strategische Bedeutung von Wasserstoff

⑩ Wasserstoff ist essenziell für die Klimaneutralität bis 2045 und zugleich ein industriepolitisches Instrument zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz Deutschlands.

Technologieoffenheit und Pragmatismus

⑩ In der Hochlaufphase sind flexible, pragmatische Regelungen notwendig – auch kohlenstoffarmer Wasserstoff soll temporär zugelassen werden.

Regulatorische Vereinfachung

⑩ Komplexe und überregulierte Prozesse behindern den Markthochlauf; der regulatorische Rahmen muss entschlackt und marktwirtschaftlich gestaltet werden.

Infrastruktur als Rückgrat

⑩ Ein zügiger Ausbau von Transport-, Speicher- und Verteilnetzen sowie Importinfrastruktur ist entscheidend – inklusive Pipelinekorridoren und Hafenterminals.

Liquidität des Marktes und verlässliche Nachfrage

⑩ Verbindliche Nachfrageinstrumente (z. B. Grüngasquote, Leitmärkte) sind notwendig, um den Handel mit Wasserstoff zu ermöglichen und Investitionen anzureizen.

Herausforderungen des Wasserstoffhochlaufs

Zusammenfassung

Breit aufgestellte Finanzierung

⑩ Staatliche Risikoabsicherung, langfristige Verträge, Differenzkostenförderung und private Kapitalmobilisierung sind für den Markthochlauf essenziell.

Regionale Wasserstoffcluster als Katalysatoren

⑩ Der Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten fördert Innovation, sichert Arbeitsplätze und stärkt die Resilienz – insbesondere durch lokale Lernprozesse.

Europäische und internationale Integration

⑩ Deutschland bleibt auf Importe angewiesen – Partnerschaften, internationale Infrastruktur und eine europäische Wasserstoff-Allianz sollen Versorgungssicherheit und Skaleneffekte sichern.

Förderpolitischer und technologischer Schulterschluss

⑩ Eine kohärente Förder-, Forschungs- und Innovationspolitik auf deutscher und EU-Ebene ist notwendig, um Technologieentwicklung und Marktdurchdringung zu unterstützen.

Lernorientierter Politikansatz

⑩ Der Markthochlauf muss durch anpassungsfähige, lernorientierte Politik mit klaren Zielmodellen, Kostensenkung und Vertrauensschutz begleitet werden.

Herausforderungen des Wasserstoffhochlaufs

Zusammenfassung



Breit aufgestellte
Finanzierung

Regionale
Wasserstoffcluster als
Katalysatoren

Europäische und
internationale
Integration

Förderpolitischer und
technologischer
Schulterschluss

Lernorientierter
Politikansatz

Katherina Reiche am 19.05.2025:

„Wir brauchen einen Rahmen für Wasserstoff, wir brauchen Leitplanken“

Die Kriterien beispielsweise für grünen Wasserstoff müssten sich ändern, etwa bei den Themen Zeitsynchronität und Additionalität.

Prof. Dr. Karsten Pinkwart

Tel.: +49 (721) 4640322

Fax: +49 (721)4640318

Mobil: +49 (160) 96475925

Stellv. Bereichsleiter

Angewandte Elektrochemie

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7 | 76327 Pfinztal (Berghausen)

E-Mail: karsten.pinkwart@ict.fraunhofer.de

Web: <http://www.ict.fraunhofer.de>

Prodekan

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

Moltkestraße 30 | 76133 Karlsruhe

E-Mail: karsten.pinkwart@hs-karlsruhe.de

Web: <http://www.hs-karlsruhe.de>

Mitglied im Nationalen Wasserstoffrat der Bundesregierung

Mitglied im Beirat Wasserstoffroadmap Baden-Württemberg

