

Übersicht über die Technologien und Perspektiven der Wasserstoffwirtschaft

ein Whitepaper der BCNP Consultants GmbH

August 2021, Tobias Kirchhoff

Kann Wasserstoff helfen den Klimawandel aufzuhalten?

80%

beträgt der derzeitige Anteil der fossilen Energieträger am Primärenergieverbrauch

Ohne Einschränkungen unserer Gewohnheiten und unseres Wohlstandes kann die starke Begrenzung von CO₂-Emissionen mit bestehenden Technologien nicht gestoppt werden

Die Nutzung von fluktuierenden erneuerbaren Energien ist aber nur durch effiziente Speicherung und Transportierbarkeit möglich

- Politik fördert Übergang von fossiler zu erneuerbarer Energie und definiert das Ziel der Treibhausgasneutralität aller Sektoren bis 2050

- Wasserstoff (H₂) auf Basis erneuerbarer Energien kann als emissionsfreie Technologie eine entscheidende Rolle bei der Senkung der CO₂-Emissionen einnehmen



Dieses Whitepaper liefert eine Übersicht über die Technologien und Perspektiven der Wasserstoffwirtschaft



Inhalte der Übersicht über die Wasserstoffwirtschaft

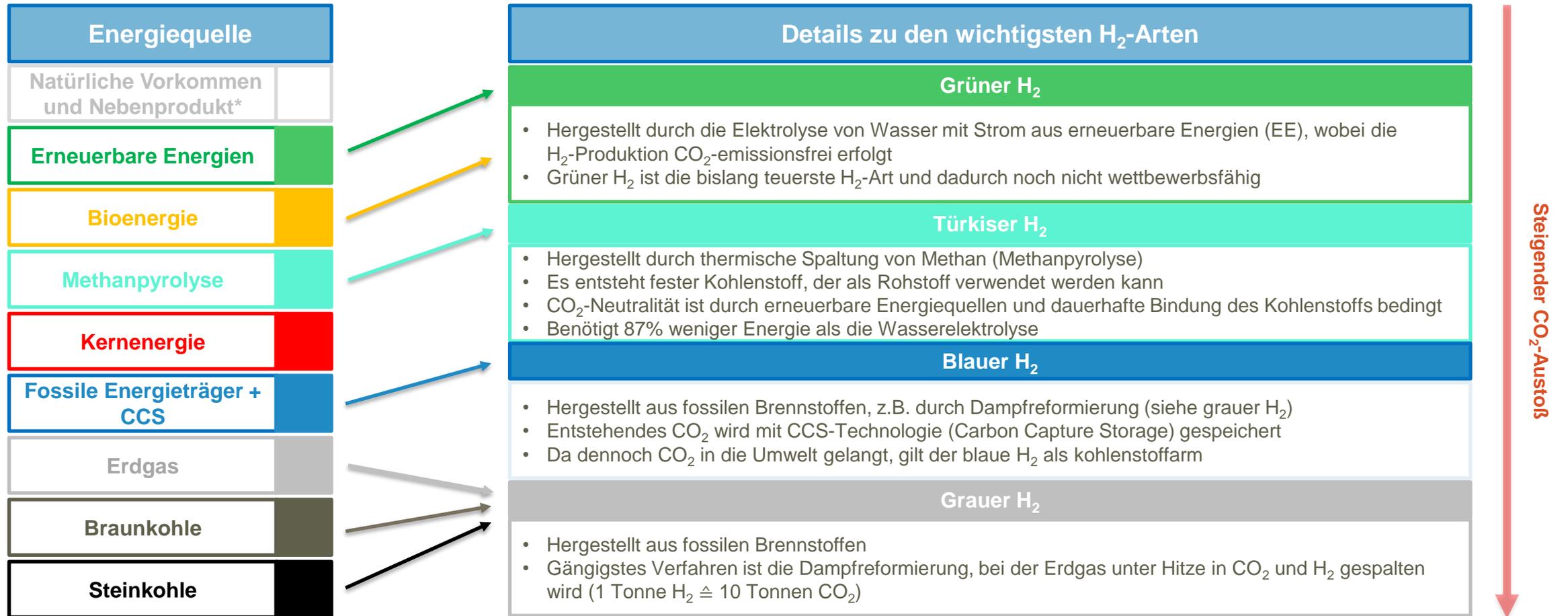
Inhaltsverzeichnis

- 1 Welche Wasserstoffarten gibt es?
- 2 Was sind die Stärken und Schwächen von grünem H₂ und wo liegen die Chancen und Risiken?
- 3 Wie sehen die Treibhausgasemissions-Einsparziele in Deutschland aus?
- 4 Welche H₂-Produktionsverfahren gibt es?
- 5 Welche Möglichkeiten der Speicherung und des Transport gibt es?
- 6 Ist eine autarke Energieversorgung durch erneuerbare Energien in Deutschland realistisch?
- 7 Wie viel H₂ muss importiert werden und woher?
- 8 Wie kann die Chemie ihre Treibhausgasemissionen senken?
- 9 Wie sieht der zukünftige Markt für grünen Wasserstoff aus?
- 10 Quo Vadis, Wasserstoff?
- 11 Welche weiteren vielversprechenden Technologien gibt es?



Grüner H₂ aus erneuerbaren Energien ist der einzige CO₂-emissionsfreie H₂

Details zu den derzeit wichtigsten H₂-Arten

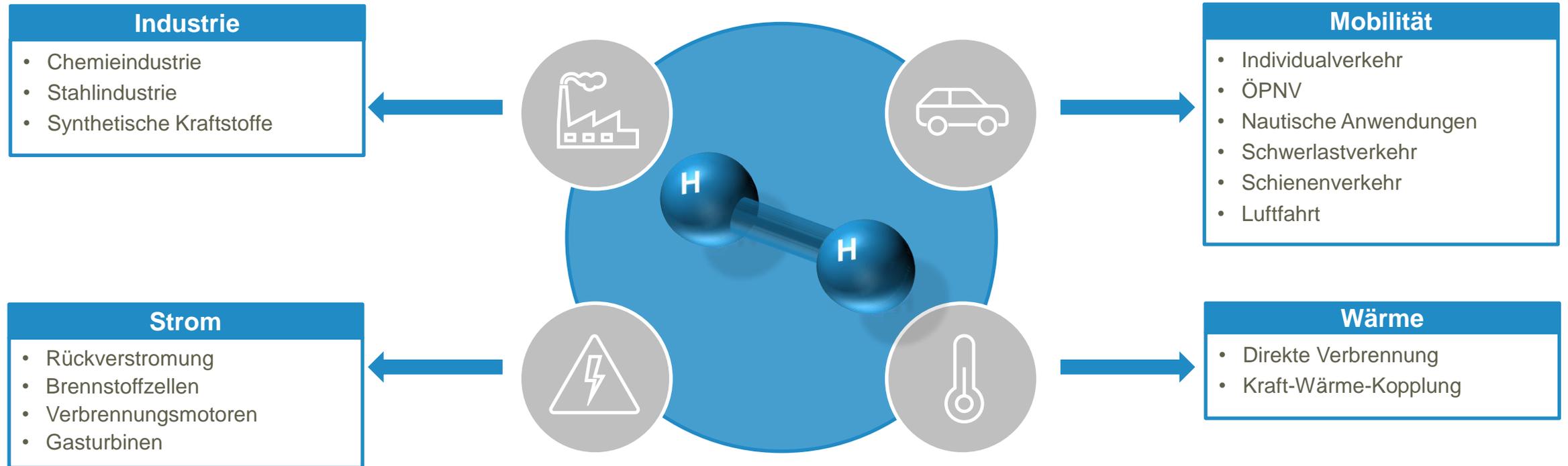


*beim Stoffwechsel von Cyanobakterien | **Quellen:** BMBF, IKEM (2020), Umweltbundesamt, BMWi (2020)



H₂ ist für viele Anwendungsgebiete geeignet

Einsatzfelder von H₂



Wasserstoff als Energiequelle und Energieträger kann in verschiedenen Bereichen eingesetzt und genutzt werden. Das gelingt u.a. durch den Einsatz von Brennstoffzellen, wobei elektrische Energie und Wärme erzeugt wird. Weiterhin kann auch der Strom aus erneuerbaren Energien für die Herstellung von CO₂-armen synthetischen Energieträgern (Power Fuels) und chemischen Grundstoffen genutzt werden.

Quellen: Shell (2017); Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020); Dena (2018)



Grüner H₂ bietet viele Chancen, ist aber noch nicht preiskompetitiv

SWOT-Analyse grüner H₂

Strengths

- CO₂-emissionsfreie Produktion durch den Einsatz von erneuerbaren Energien (EE)
- Dezentraler oder zentraler Einsatz von Elektrolyseuren möglich
- Chemischer Energiespeicher – lässt sich anders als elektrische Energie über längere Zeiträume und in großen Mengen speichern
- Energieträger - flexibel einsetzbar und leicht transportierbar
- Viele Anwendungsgebiete: Verkehr, Gebäude und Industrie
- Power-to-X: Elektrische Energie aus EE kann durch H₂ in synthetische Energieträger konvertiert werden und dort zum Einsatz kommen, wo Energieeffizienz und elektrische Energie aus EE nicht ausreichen
- Klimaneutraler Kraftstoff: Saubere Verbrennung - es entsteht nur Wasserdampf
- H₂-Brennstoffzellen sind leistungsfähiger und energieeffizienter als fossile Brennstoffe - gravimetrische Energiedichte ist fast drei Mal so hoch wie für flüssige fossile Brennstoffe
- Schnelle Ladezeiten der Brennstoffzellen im Mobilitätsbereich
- Kraftwärmekopplung durch Einsatz von Brennstoffzellen (H₂ als Wärmelieferant)
- Schon lange als grauer H₂ etabliert in der Industrie



Weaknesses

- Grüne H₂-Gestehungskosten sind nicht wettbewerbsfähig mit den Kosten für graues H₂
- Elektrolyseure weisen einen hohen Strombedarf auf und es werden große Mengen EE benötigt - viele Länder sind auf Import angewiesen
- Hohe Investitions- und Betriebskosten für die Elektrifizierung der Anlagen notwendig
- Mit der alkalischen Elektrolyse ist nur ein H₂-Produktionsverfahren kommerziell im großen Maßstab verfügbar, viele potentielle Technologien befinden sich erst in der Laborphase
- Noch zu geringe Produktionsleistungen der Elektrolyseure
- Teilweise werden seltene Rohstoffe benötigt (z.B. PEM: Iridium und SOEC: Yttrium)
- Hohe F&E-Investitionen in den Bereichen Produktion, Speicherung und Transport
- Geringe volumetrische Energiedichte - zur Speicherung werden große Energiemengen benötigt (Kompression, Verflüssigung, Kühlung)
- Elektrolyseure benötigen große Mengen H₂O – je kg H₂ werden 9 – 15 Liter benötigt
- Für den Einsatz von Meerwasser sind Entsalzungsanlagen notwendig, die bisher auf fossilen Energieträgern basieren und unter großem Energieeinsatz betrieben werden
- Braucht neue Sicherheitsstandards und gesellschaftliche Akzeptanz



Opportunities

- Regulierungen seitens der Politik um 2050 klimaneutral zu sein – H₂ kann als alternative Energiequelle ein Schlüsselbaustein sein
- Der H₂-Bedarf soll Prognosen zu Folge weltweit um das siebenfache bis 2050 ansteigen
- Hydrogen Council erwartet ein Investitionspotential von 240 Mrd. € bis 2030 für die Produktion, Speicherung und den Transport von H₂
- Erschließung neuer internationaler Partnerschaften, neuer Geschäftsbereiche und Märkte
- Mögliche CO₂-Steuer würde dazu führen, dass grüner H₂ früher wettbewerbsfähig ist
- Dauerhafte Technologieführerschaft bei Schlüsseltechnologien möglich (in Produktion, Speicherung, Transport)
- Hohes Exportpotential für führende Technologienationen und Länder mit optimalen Ressourcen für die Erzeugung von EE
- Großes Potential für einzelne Industriezweige (Ingenieurwesen, Gasindustrie)
- Wichtiges zukünftiges Standbein der Fahrzeug- und Zulieferindustrie
- Teilweise Übernahme bestehender Wertschöpfungsketten



Threats

- Kostensenkungen sind sehr schwer zu prognostizieren
- Stromgestehungskosten aus EE sind zu hoch und grüner H₂ ist für Unternehmen wirtschaftlich nicht rentabel
- Import von EE kann zur Abhängigkeit für ressourcenschwache Länder von ressourcenstarken Ländern führen
- Technologieführerschaft von Regionen/Nationen
- Starke Abhängigkeit von der Politik bzw. von Regulierungen (Verfügbarkeit von bezahlbaren EE, Förderungen der Technologien, staatliche Zuschüsse etc.)
- Fehlender Absatzmarkt – Einsatz/Produktion von grünem H₂ wird nicht honoriert
- Market ramp-up risks – geringe Marktdynamik und geringere Kostensenkungen als erwartet
- First mover Unsicherheit (Markt, Technologien)
- Technische Gefahren und Risiken beim scale-up, Transport, Speicherung und Distribution
- Konkurrenztechnologie ausgereifter und preiswerter
- Lock-in effects – Bessere Alternative zum H₂ wird gefunden



PEM: Proton-Exchange Membran Electrolysis, SOEC: Solid Oxid Electrolyzer Cell | Quellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020); Greenpeace (2020); Shell (2017); Allianz (2021); Uni Köln (2021)

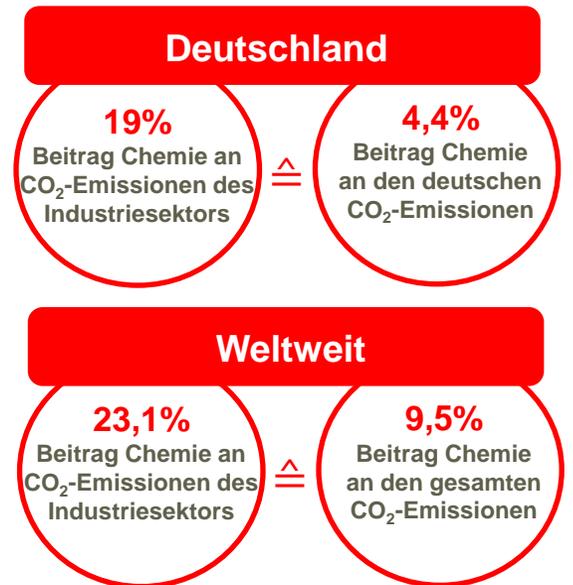
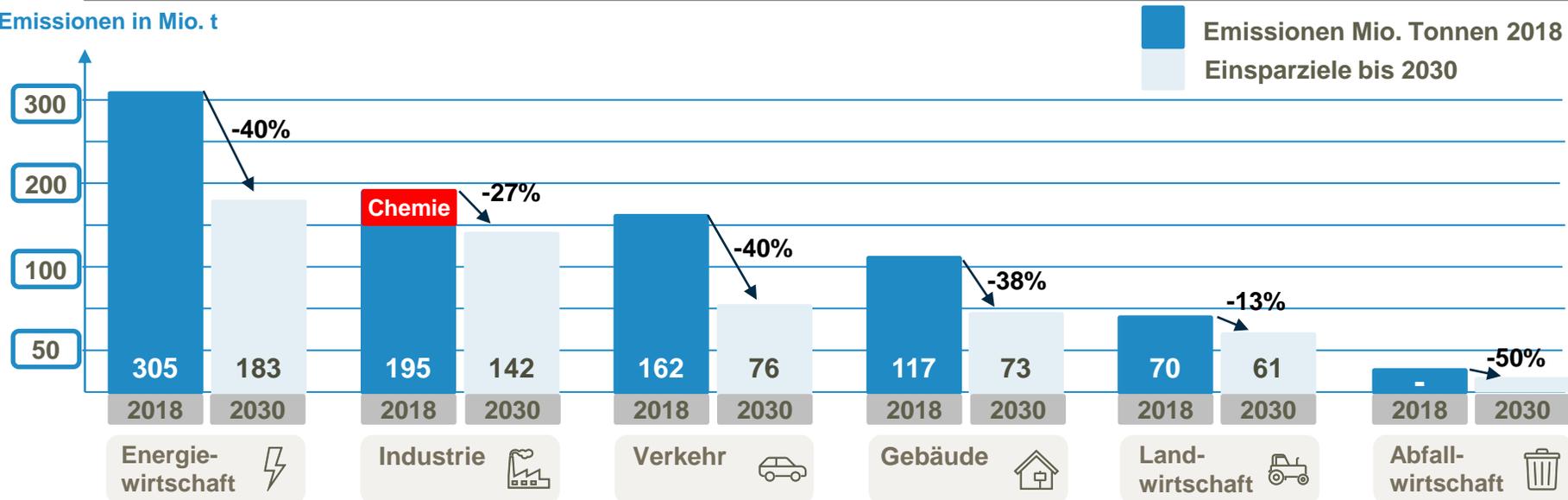


Klimafreundlicher H₂ kann Schlüsselement für Treibhausgasemissionseinsparungen sein

Sektorale Emissions-Einsparziele bis 2030 in Deutschland

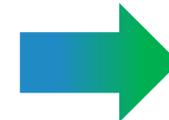
- Treibhausgasemissionen sollen ausgehend vom Basisjahr 1990 bis 2050 um 80-95% gesenkt werden (Pariser Klimaabkommen)
- Von 1990 bis 2017 sanken die Treibhausgasemissionen der deutschen Chemieindustrie bereits um 48%

Emissionen in Mio. t



Möglichkeiten der Einsparung von Treibhausgasemissionen:

- ➔ Durch starke Einschränkungen, was zu einem geringeren Primärenergieverbrauch führen würde
- ➔ Durch effizientere emissionsfreie Technologien



H₂

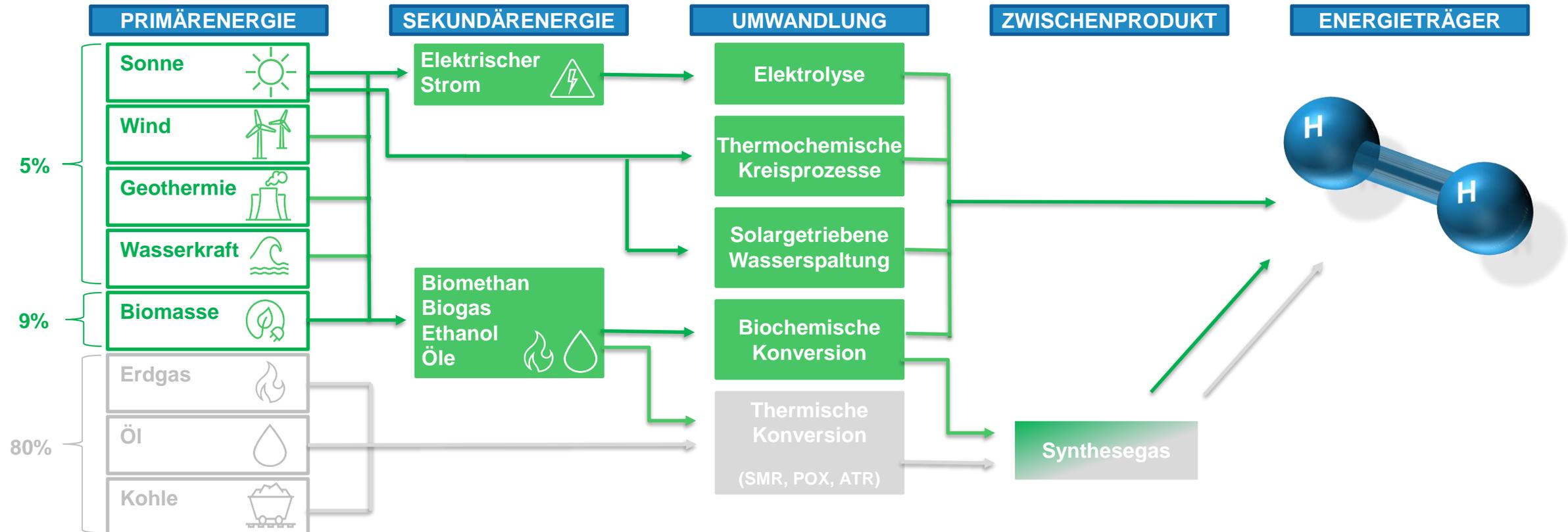
Technologien zur Produktion von grünem H₂ ermöglichen eine CO₂-Reduktion vor allem in der Industrie und dem Verkehr, wo Energieeffizienz und die direkte Nutzung von Strom aus EE nicht ausreichen

Quellen: DECHEMA & FutureCamp für den VCI (2019); Deloitte (2020); KEI; BMWi; Klimaschutzprogramm; UBA (2020)



H₂ wird derzeit noch zu 80% aus fossilen Energieträgern gewonnen

Darstellung ausgewählter H₂-Produktionsverfahren aus erneuerbarer und fossiler Energie



Anteil der primären Energieträger an der globalen H₂-Produktion ➡ ca. 81% fossile Energieträger, 14% erneuerbare Energie und 5% Kernenergie

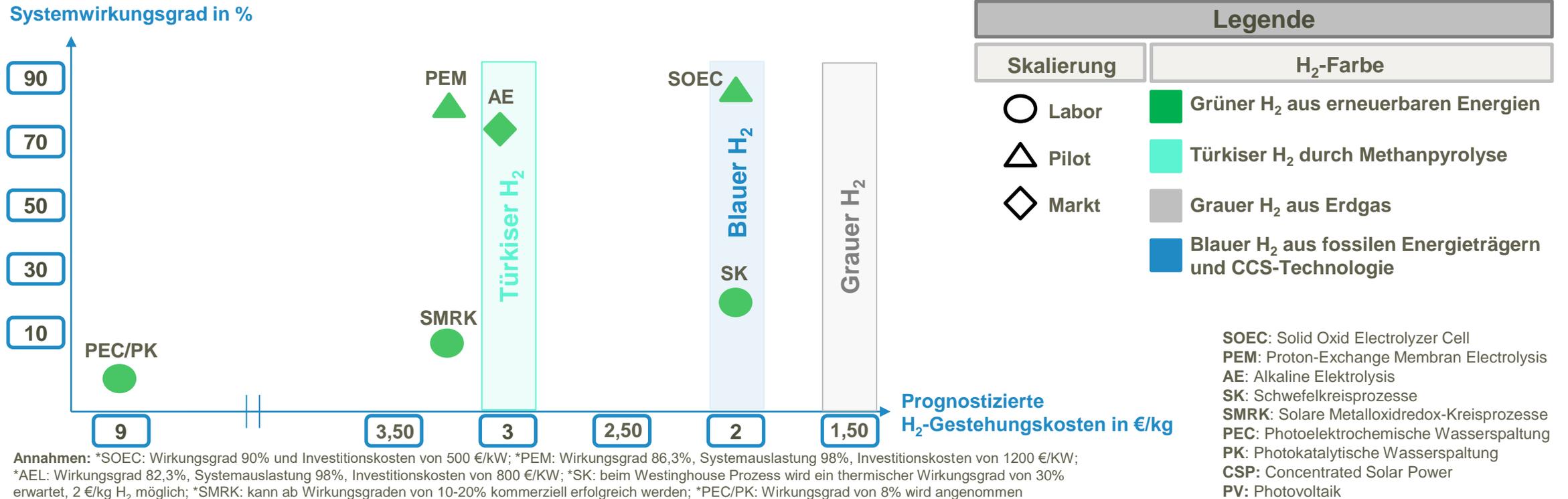
➡ Für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen sind klimafreundliche Alternativen zu fossilen Energieträgern essentiell

SMR: Steam Methane Reformierung, POX: Partielle Oxidation, ATR: Autotherme Reformierung | Quellen: Shell (2017); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020), IEA (2020)



Grüner H₂ kann durch SOEC und thermochemische Kreisprozesse wettbewerbsfähig werden

Vergleich ausgewählter Produktionsverfahren für grünen H₂ auf Basis ihrer Potentiale



Annahmen: *SOEC: Wirkungsgrad 90% und Investitionskosten von 500 €/kW; *PEM: Wirkungsgrad 86,3%, Systemauslastung 98%, Investitionskosten von 1200 €/kW;
*AEL: Wirkungsgrad 82,3%, Systemauslastung 98%, Investitionskosten von 800 €/kW; *SK: beim Westinghouse Prozess wird ein thermischer Wirkungsgrad von 30%
erwartet, 2 €/kg H₂ möglich; *SMRK: kann ab Wirkungsgraden von 10-20% kommerziell erfolgreich werden; *PEC/PK: Wirkungsgrad von 8% wird angenommen

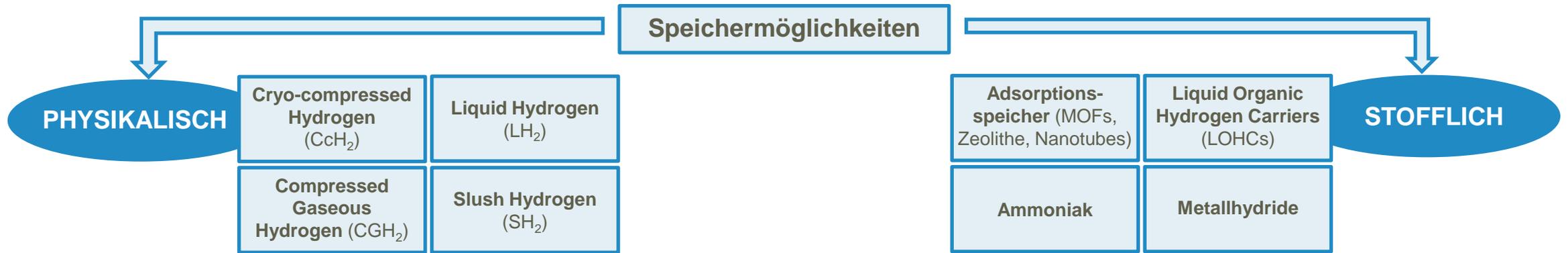
- ➔ Kurzfristig weisen die AE und PEM mit CSP-Strom oder PV/CSP-Kombianlagen das größte Potential auf
- ➔ Erreicht die SOEC großtechnische Marktreife, verspricht die Kombination mit PV/CSP-Hybridkraftwerk die niedrigsten Wasserstoffgestehungskosten
- ➔ Analysten von Bloomberg New Energy Finance (BNEF) erwarten, dass in Deutschland bis zum Jahr 2050 Herstellungskosten für grünen Wasserstoff zwischen 0,70 - 1,50 €/kg H₂ realisiert werden können

Quellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020); Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW, 2018); BloombergNEF (2020)

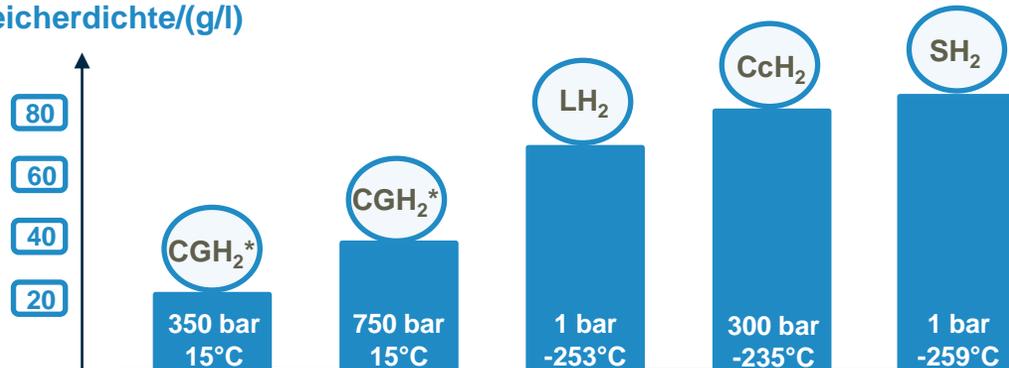


H₂ eignet sich sehr gut als Langzeitspeicher, es werden aber große Energiemengen benötigt

Physikalische und Stoffliche Speichermöglichkeiten von H₂



H₂-Speicherdichte/(g/l)



- H₂ hat die mit Abstand höchste gravimetrische Energiedichte
 - Volumetrische Energiedichte von H₂ ist allerdings vergleichsweise gering
- ➔ Speicherdichte von H₂ kann folglich durch Verdichtung und/oder Kühlung signifikant erhöht werden

Höhere Speicherdichte ➔ Größerer Energiebedarf ➔ Höherer Preis

Größte Herausforderungen:

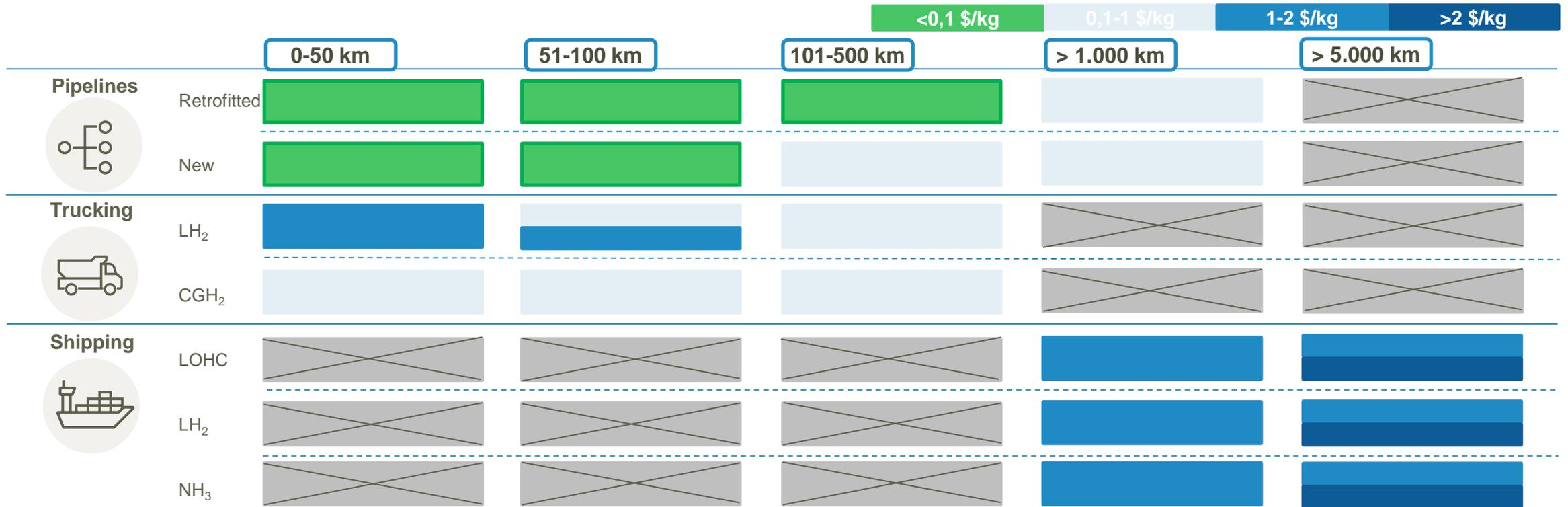
- H₂ reagiert stark mit O₂
- Geringe Molekülgröße ➔ H₂ diffundiert leicht
- Zur Speicherung werden hohe Energiemengen benötigt (Kompression, Verflüssigung)

*für die Anwendung im Mobilitätsbereich | Quellen: Shell (2017); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020)



Die Wahl der Transportform ist vor allem von der Entfernung abhängig

Vergleich über die Transportmöglichkeiten von H₂



Kostengünstigste Transportform ergibt sich durch:

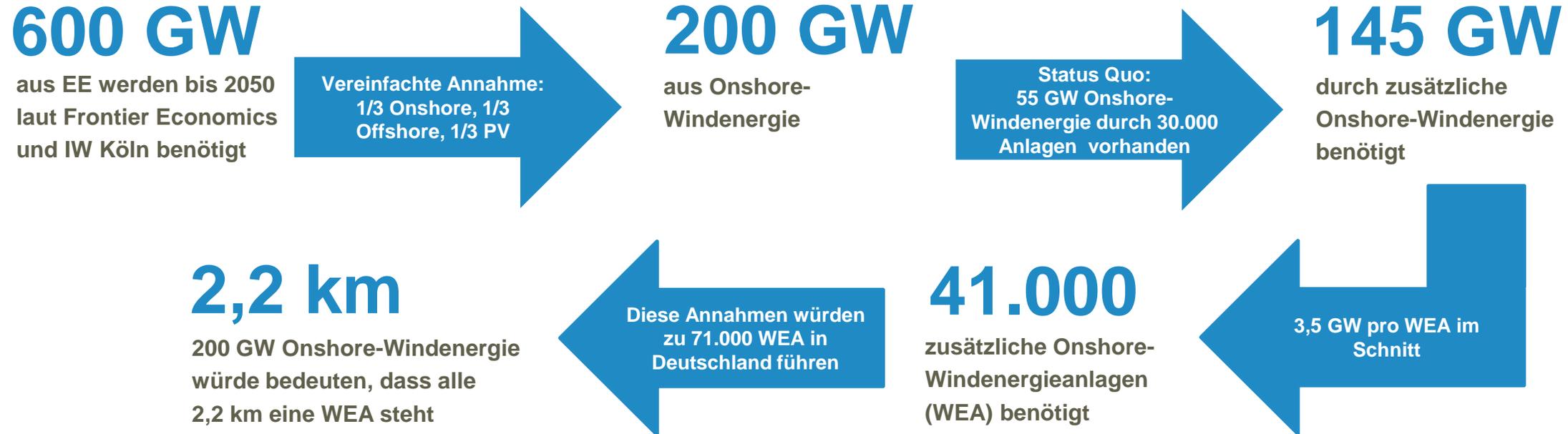
- Entfernung
- Endanwendung (Menge bzw. als LH₂, NH₃ oder LOHC)
- standortspezifische Bedingungen (Infrastruktur, Platzbedingungen)

Quellen: Hydrogen Council, McKinsey & Company (2021); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020)



Deutschland wird Bedarf an erneuerbarer Energie nicht selbst decken können

Vereinfachte Herleitung zum Importbedarf von H₂ in Deutschland



- Dass alle 2,2 km in Deutschland eine WEA steht ist nicht realistisch, da u.a. die bebaute Fläche, die Akzeptanz der Gesellschaft und ungeeignete Flächen nicht berücksichtigt wurden
- Deutschland muss einen erheblichen Teil an erneuerbare Energie in Form von H₂ importieren
- Aber auch aktuell ist Deutschland stark abhängig von anderen Ländern und importiert ca. 2/3 seines Primärenergieverbrauchs

Eine Gruppe von WEA (Windenergieanlage/Windrad) wird als Windpark bezeichnet | Quellen: Wuppertaler Institut (2020); BWE e.V.; Agentur für Erneuerbare Energie; Umweltbundesamt; Frontier-Economics



Deutschland wird mehr als die Hälfte an H₂ importieren müssen

Zukünftiger Bedarf an H₂ für Deutschland

Prognosen der H₂-Nachfrage der Endverbrauchssektoren (Industrie, Verkehr, Gebäude) für die Jahre 2030 und 2050 in Deutschland auf Basis verschiedener Studien (H₂-Bedarf 2020: ca. 55 TWh), 2030: 80-110 TWh, 2050: 200-450 TWh

Nationale Wasserstoffstrategie

Ziel: inländischer H₂-Produktionsanteil von 14%
(zum Umfang des Imports werden keine Angaben gemacht)

Annahmen: H₂-Bedarf 2030 von 90-110 TWh/a und 2050 von 110-380 TWh/a

Ziele für 2030:

- H₂-Erzeugungsleistung von 5 GW bzw. von 14 TWh/a
 - Vergleich 2020: 3,85 TWh über Elektrolyseverfahren
 - Strommenge aus EE: 20 TWh
- Bei einer gegebenen H₂-Nachfrage von 450 TWh im Jahr 2050 wäre eine Gesamtkapazität an heimischen Elektrolyseuren von 25 GW und eine zusätzlichen EE-Leistung von 53 GW erforderlich

Umlaut energy (2020)

Szenarien für 2050:

Szenario 80: (CO₂-Reduktion um 80% im Vergleich zum Basisjahr 1990)

- H₂-Bedarf von etwa 145 TWh – entspricht ca. 4 Mio. Tonnen H₂

Szenario 95:

- H₂-Bedarf von 399 TWh – entspricht 12 Mio. Tonnen H₂

Ergebnis: inländischer Produktionsanteil von 45%
(ergibt sich durch eine Optimierung, Modell minimiert die „Total Annual Cost“ und erfüllt gleichzeitig die Restriktionen der CO₂-Zielerreichung)

- Dadurch ergibt sich ein Inländischer Elektrolysebedarf für 2050 von 62 GW Elektrolyseleistung (2900 Vollaststunden pro Jahr) und 168 GW an zusätzlicher EE-Leistung



Deutschland muss einen erheblichen Anteil an H₂ importieren - um den Import in Grenzen zu halten sind in Zukunft leistungsstärkere Elektrolyseure erforderlich (aktuell liegt der Wirkungsgrad bei 67%)

Quellen: NOW (2018a, 2018b); Fraunhofer (2019), Dena (2018); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST 2019); Umlaut energy (2020); BMWi (2020), Wuppertaler Institut (2020)



Die MEA-Regionen bieten die geringsten H₂-Importkosten für Deutschland

H₂-Importpotential für Deutschland für ausgewählte Regionen

low H₂-Importpotential für Deutschland high



APAC	North America	Europe	LATAM	MEA
<ul style="list-style-type: none">Für diese Länder sind die H₂-Importkosten für Deutschland am höchstenAustralien<ul style="list-style-type: none">Vorzugsregion für PVH₂-Importkosten von ca. 4,9 €/kgExportpotential von 100 Mio. t/aInnere Mongolei<ul style="list-style-type: none">Vorzugsregion für Onshore-WindenergieH₂-Importkosten von 5,0 €/kgExportpotential von 100 Mio. t/aChina<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten von 5,5 €/kgExportpotential von 50 Mio. t/a	<ul style="list-style-type: none">Kanada hat ein viel geringere H₂-Erzeugungskosten und ein größeres Erzeugungspotential als die USAKanada<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten zwischen 4,1 €/kg und 4,2 €/kgExportpotential von 200 Mio. t/aUSA<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten von ca. 4,8 €/kgExportpotential von 10 Mio. t/aHohes Potential zur geothermischen Stromerzeugung	<ul style="list-style-type: none">In den südlichen Regionen Europas (Südspanien, Sizilien, Kreta) kann eine hohe Sonneneinstrahlung von über 1800 kWh/m²/a erreicht werdenGrößere saisonale Schwankungen als in der MENA-RegionDas Exportpotential liegt zwischen 10-20 Mio. t/aIsland:<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten von 3,9 €/kgNorwegen:<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten von 4,3 €/kg	<ul style="list-style-type: none">Patagonien<ul style="list-style-type: none">ist eine Vorzugsregion für Onshore-WindenergieH₂-Exportpotential von ca. 200 Mio. t/aSehr niedrige H₂-Importkosten für Deutschland zwischen 4,0 €/kg und 4,2 €/kg bei 2,52 €/kg H₂-GestehungskostenChile<ul style="list-style-type: none">Vorzugsregion für PV und CSPExportpotential von 50 Mio. t/aH₂-Importkosten von ca. 4,3 €/kg	<ul style="list-style-type: none">Hier liegt das größte Potential für die H₂-Produktion durch Elektrolyse mittels CSP-Strom durch die vorhandene Direkteinstrahlung und die bebaubaren FlächenOman:<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten zwischen 3,9 €/kg und 4,1 €/kgExportpotential von 200 Mio. t/aSaudi-Arabien:<ul style="list-style-type: none">H₂-Importkosten zwischen 3,7 €/kg und 4,3 €/kgExportpotential von 500 Mio. t/aWeitere wichtige Regionen: Marokko, Algerien, Ägypten, Libyen

Importkosten beinhalten Elektrizität, Elektrolyse, Leitungen, Verflüssigung, LH₂ Speicherung und LH₂ Transport; CSP: Concentrated Solar Power | Quellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2020); Umlaut energy (2020); Wuppertaler Institut (2020)



Für eine Treibhausgasneutrale Chemie 2050 werden 45 Mrd. € und 628 TWh/a Strom benötigt

Roadmap 2050 zur Senkung der THG-Emission der chemischen Industrie in Deutschland

Referenzpfad  82,1 Mio. t CO ₂	<ul style="list-style-type: none">➤ Bildet die heutige Struktur der Chemieindustrie in Deutschland ab• Effizienzsteigerung und Kohleausstieg verringern die Treibhausgase bis 2050 um 27%• Die Klimabilanz der deutschen Chemie wird sich dadurch bis 2030 deutlich verbessern, nach 2030 sinkt das Emissionsniveau aber nur noch langsam➤ Das Minderungspotential durch die weitere Optimierung der konventionellen Prozesse ist nahezu ausgereizt	 0 Mrd. € zusätzliche Investitionen	 54 TWh Strombedarf pro Jahr	-27%
Technologiepfad  44,4 Mio. t CO ₂	<ul style="list-style-type: none">➤ Baut auf dem Referenzpfad auf und beinhaltet die Nutzung neuer Technologien• Höhere Investitionen für neue Verfahren mit vierfachem Strombedarf verringern die Treibhausgase um 61%• Die Treibhausgasreduzierung ab 2030 wird deutlich stärker ausfallen, wenn die deutsche Chemie stark in neue Prozesstechnologien in der Basischemie investiert• Unternehmen müssen erheblich in F&E der Verfahren investieren, damit die Technologien 2040 bereitstehen	 15 Mrd. € zusätzliche Investitionen	 224 TWh Strombedarf pro Jahr	-61%
Treibhausgasneutralitätspfad  0,0 Mio. t CO ₂	<ul style="list-style-type: none">➤ Keine Restriktionen, maximale Investitionen für alternative Verfahren mit mehr als elffachem Strombedarf verringern die Treibhausgase um nahezu 100%• Technologien werden in diesem Pfad schon eingeführt, wenn sich eine CO₂-Ersparnis ergibt unabhängig von der Wirtschaftlichkeit• Für die deutsche Chemie würde das einen Strombedarf ab Mitte der 2030er Jahre von 628 TWh bedeuten, was mehr als der gesamten deutschen Stromproduktion von 2018 (540 TWh) entspricht	 45 Mrd. € zusätzliche Investitionen	 628 TWh Strombedarf pro Jahr	-100%

THG: Treibhausgasemissionen | Quellen: DECHEMA & FutureCamp für den VCI (2019), Fraunhofer (2019)

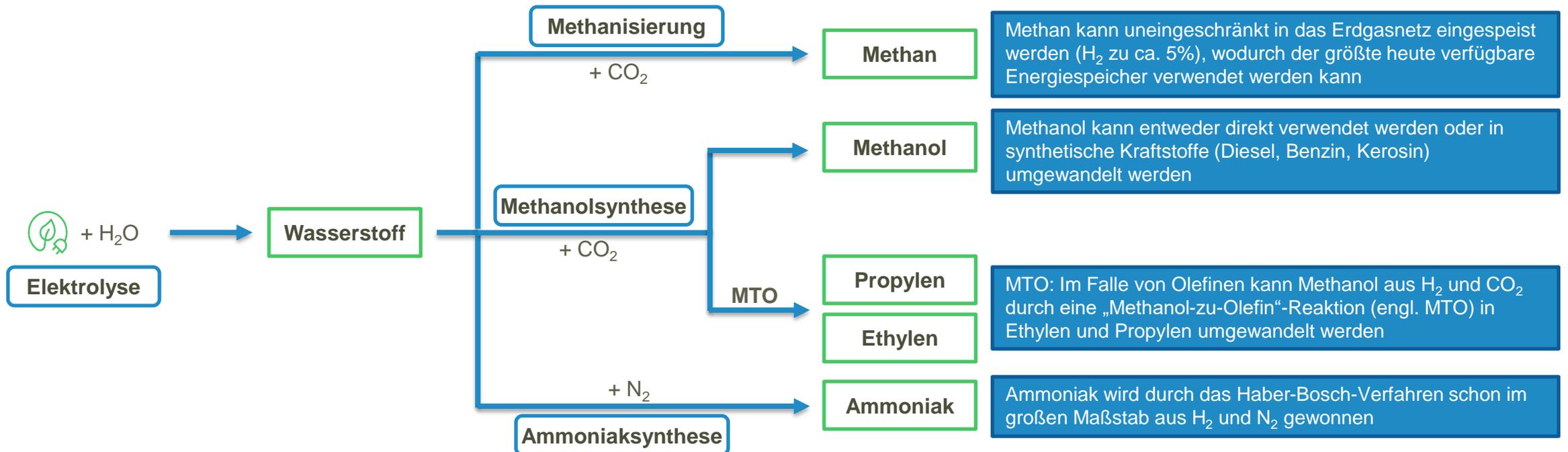


Power-to-X kann zur Dekarbonisierung von chemischen Grundstoffen beitragen

Power-to-X: Verwendung von H₂ in der Chemiebranche

Durch die Power-to-X-Technologien (Technologien zur Speicherung bzw. Nutzung von Stromüberschüssen) kann Strom aus erneuerbaren Energien für die Herstellung von H₂, CO₂-armen synthetischen Energieträgern (Power Fuels) und chemischen Grundstoffen verwendet werden

- ➔ Grüner H₂ hat das Potential, um fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie zu ersetzen und die chemische Industrie zu dekarbonisieren
- ➔ Aber: Durch die Power-to-X-Technologien lassen sich große Anwendungsgebiete erschließen, was zu einem starken Wettbewerb um grünes H₂ führen wird. Allein für die Chemieindustrie erwartet der VCI einen H₂-Bedarf von 7 Mio. Tonnen



Quellen: Deutsche Energie-Agentur (dena, 2018); Hydrogen Council (2021); Agentur für Erneuerbare Energien, VCI (2020)



Es entwickelt sich ein Multi-Milliarden Dollar Markt in den kommenden Jahren

Übersicht über den zukünftigen Markt von grünem H₂

200+ projects

Über 200 H₂-Projekte wurden bereits angekündigt:
17 sind bereits angekündigte Giga-Scale-Produktionsprojekte
(mehr als 1 GW für erneuerbaren H₂)

10 tn Euro

VDMA and BCG erwarten, dass Ingenieurunternehmen ein Umsatzpotential von
10 Billionen Euro bis 2050 erreichen können

6.7 mn tons

Der Hydrogen Council geht von einem Investitionspotenzial von 240 Mrd. Dollar zwischen
2018 und 2030 für die Produktion, Lagerung, Transport und die Verteilung von H₂ aus

2030

Grüner H₂ könnte in optimalen Regionen (Spanien, Chile, Naher Osten) bereits 2030
so teuer sein wie grauer H₂

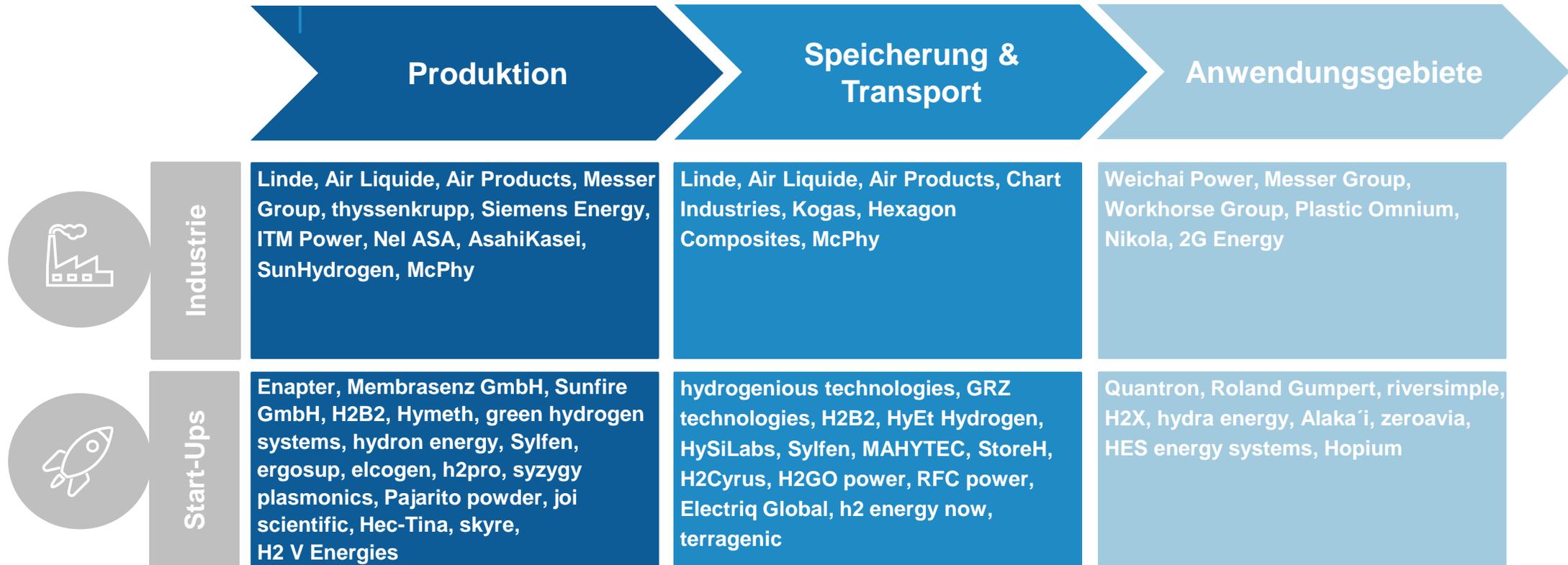
- ✓ Investitionskosten der Elektrolyseure sinken (bis 2030 auf etwa USD 200-250/kW)
- ✓ Auslastung der Elektrolyseure steigt weiter an (durch Zentralisierung der Produktion, bessere Mischung von erneuerbaren Energien und optimierte Konstruktionen)
- ✓ Stromgestehungskosten sind rückläufig, vor allem an Standorten mit optimalen Ressourcen

Quellen: Hydrogen Council, McKinsey & Company (2021); BCG & VDMA (2020)



Verschiedene Player mit neuen Technologien treiben den Markt an

Market Value Chain Grüner H₂ mit ausgewählten Vertretern



Quelle: Unternehmen

Quo Vadis H₂?



Extrem großes Potential zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren



- Technologien im Bereich der Produktion, Speicherung und des Transports stehen am Anfang ihrer Entwicklung.
- Essentielle Voraussetzung ist die preisliche Wettbewerbsfähigkeit von grünem H₂ gegenüber grauem H₂ was nur durch ausreichende und kostengünstige Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien erreicht werden kann.
- Deutschland und viele andere Länder werden aufgrund schlechter Ressourcen – wie auch bei fossilen Energietägern – den eigenen Bedarf an erneuerbaren Energien und H₂ nicht selber decken können und sind auf Import angewiesen.
- Politik muss Anreize liefern, damit auch kurz- bis mittelfristig die Herstellung von grünem H₂ attraktiv ist.
- CO₂-Bepreisung, die Einführung von Mindestquoten für grünen H₂ oder auch Investitionsboni in entsprechende Start-ups und Projekte könnten Möglichkeiten sein.



Vielversprechende Technologien zur H₂-Produktion befinden sich in der Forschung

Technologische Perspektiven: Weiteres Interessantes

Wasserbedarf für die Elektrolyse

- Für 1 kg H₂ werden 9 - 15 L H₂O benötigt
- Szenario 95 (Umlaut energy): Berechnet einen H₂-Bedarf von 12 Mio. t H₂ nur in Deutschland
- Das würde einem H₂O-Bedarf zwischen 108 - 180 Mrd. Liter entsprechen
- Um die Versorgung der Bevölkerung nicht zu gefährden muss das H₂O für die Elektrolyse zwingend aus Meerwasser gewonnen werden
- Gegenwärtige Elektrolyseure Systeme arbeiten mit reinem Wasser und können keinen H₂ aus salzhaltigem Wasser gewinnen
- Für die Umstellung der Produktion auf Meerwasser sind Entsalzungsanlagen notwendig, die größtenteils auf fossilen Energieträgern basieren und nur unter großem Energieeinsatz betrieben werden können
- Das INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien hat einen Weg gefunden, dem Meerwasser direkt mit einer Brennstoffzelle das Salz zu entziehen - Das könnte die Herstellung von Wasserstoff im großen Maßstab revolutionieren

Weißer Wasserstoff durch photobiologische H₂-Produktion

- Das Grundkonzept besteht in der Nutzung der oxygenen Photosynthese von Cyanobakterien, wodurch weißer H₂ gebildet wird
- Die durch die H₂O-Oxidation freigesetzten Elektronen werden bei der Biophotolyse über die Photosysteme und Redox-Kofaktoren auf eine Hydrogenase übertragen, die die Elektronen zur H₂-Bildung nutzt
- Problematiken: Hydrogenasen haben eine ausgeprägte Sensitivität gegenüber O₂ und die H₂-Bildung benötigt ein stark negatives Redoxpotential
- In der Biophotovoltaik ist keine Gasabtrennung erforderlich, da die O₂- und H₂-Bildung in getrennten Kompartimenten stattfindet
- Beim Verfahren des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung in Leipzig kann H₂ schon heute erfolgreich abgetrennt werden
- Die erreichte Effizienz bei der Umwandlung von Licht in H₂ ist allerdings noch gering und das Verfahren steht noch sehr am Anfang der Entwicklung

Dunkle Fermentation:

- Unter dunkler Fermentation versteht man die Fähigkeit mikrobielle Biomasseumwandlungsprozesse von Mikroorganismen zu nutzen, Biomasse zu verdauen und H₂ zu produzieren, wobei kein Licht benötigt wird
- Diese Verfahren sind sehr frühe Technologien und deren Potential zur großskaligen H₂-Erzeugung muss noch herausgefunden werden
- Unter Laborbedingungen konnten schon vielversprechende Ergebnisse erzielt werden
- Produktionskosten der mikrobiellen Elektrolyse werden auf 1,7 – 2,6 US\$/kg H₂ geschätzt

„Strom als Rohstoff“:

- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) arbeitet daran aus Strom Wasserstoffperoxid zu erzeugen
- Wachsendes Interesse am Markt: Start-up HPNow arbeitet an einer marktreifen Lösung, im Dezember 2017 investierte der deutsche Chemiekonzern Evonik

Kernenergie:

- Atomstrom ist keineswegs CO₂-neutral, die Treibhausgasemissionen sind größtenteils der Stromproduktion vor- und nachgelagert
- Es fallen auch Emissionen im Betrieb an, da Uran abgebaut, angereichert und für lange Zeit endgelagert werden muss

Quellen: Wuppertaler Institut (2019); Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Leipzig (2021); VGB PowerTech 4, Wissen & Umwelt (2021); Umweltbundesamt (2019); energate messenger, Circular Technology (2021)



Abkürzungsverzeichnis

AE	Alkalische Elektrolyse
ATR	Autotherme Reformierung
CcH₂	Cryo Compressed Hydrogen
CCS	Carbon Capture Storage
CGH₂	Compressed Gaseous Hydrogen
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CSP	Concentrated Solar Power
EE	Erneuerbare Energien
GW	Gigawatt
H₂	Wasserstoff/Hydrogen
LH₂	Liquid Hydrogen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
MOFs	Metal-Organic Frameworks
MTO	Methanol to Olefins

NH₃	Ammoniak
O₂	Sauerstoff
PEC	Photoelektrochemische Wasserspaltung
PEM	Proton-Exchange Membrane
PK	Photokatalytische Wasserspaltung
POX	Partielle Oxidation
PV	Photovoltaik
SH₂	Slush Hydrogen
SK	Schwefelkreisprozesse
SMR	Steam Methane Reforming
SMRK	Solare Metalloxidredox-Kreisprozesse
SOEC	Solid Oxid Electrolyzer Cell
TWh	Terrawattstunde
WEA	Windenergieanlage



Get in contact!



Tobias Kirchhoff

Senior Consultant

Fon: +49 (0) 221 – 95 43 97 41

Email: kirchhoff@bcnp.com