



Potentialen för offshore elektrolys och gröna energibäraren i framtiden.

Lars Koponen

Examensarbete

Energi- och miljöteknik

2024

Examensarbete

(Författare) Lars Koponen

Potentialen för offshore elektrolys och gröna energibäraren i framtiden.
Yrkeshögskolan Arcada: Energi- och miljöteknik, 2019.

Identifikationsnummer:

283

Uppdragsgivare:

Arcada, avdelningen för energi- och miljöteknik

Sammandrag:

Som följd av Parisavtalet år 2015 skrev EU-parlamentet under den europeiska gröna given, som ställt målet att tills 2030 minska växthusgasutsläpp 55% jämfört med nivån år 1990, samt att uppnå koldioxidneutralitet senast vid år 2050. EU:s offshore energistrategi framför offshore vind som en central faktor för att uppnå klimatmålen. År 2022 var 30 GW den totala installerade kapaciteten för offshore vind i Europa, med en genomsnittlig ökning av 3 GW per år. Trots ökningen har IPCC konstaterat att den nuvarande spridningen av förnybara energikällor är otillräcklig för att möta klimatmålen. Offshore vindenergi förväntas därför att fortsätta öka i mängd. EU:s löfte är att ytterligare öka mängden av offshore vindkraftverk med upp till 160 GW senast år 2030.

Medan takten av andelen intermittenta energikällor som till exempel vindkraft i energisystemet ökar, ökar också behovet av flexibilitet. Det är också önskvärt att minska inskränkning för maximalt utnyttjande av turbinerna och därigenom öka deras värde. Grön vätgas och grön ammoniakproduktion från elektrolys anses potentiellt vara hållbara alternativ för detta ändamål. Denna studie syftar till att analysera rollen som grönt väte och grön ammoniak kan spela i avkarboniseringen av energisystemet och undersöka dess fördelar och utmaningar. [8]

Nyckelord:

Offshore elektrolys, grönt väte, grön ammoniak, energilagring.

Degree Thesis

(Author) Lars Koponen

The Potential of Offshore Electrolysis and Green Energy Carriers in the Future.

Arcada University of Applied Sciences: Energy and Environmental Engineering, 2019.

Identification number:

283

Commissioned by:

Arcada, the Department of Energy and Environmental Engineering

Abstract:

As a result of the Paris Agreement in 2015, the EU Parliament endorsed the European Green Deal, which sets goals to cut greenhouse gas emissions by 55% from 1990 levels by 2030 and to achieve carbon neutrality by 2050. According to the EU's offshore energy strategy, offshore wind energy plays a key factor in achieving these climate goals. The total installed capacity of offshore wind in Europe was 30 GW in 2022, with an average annual increase of 3 GW. Despite this growth, the IPCC has concluded that the current deployment of renewable energy sources is insufficient to meet current climate goals. Therefore, offshore wind energy is expected to continue to grow, with the EU pledging to further increase the installed capacity of offshore wind farms to 160 GW by 2030, while the capacity is expected to rise to 60 GW. As the share of intermittent energy sources in the energy system, such as wind power, increases, so does the need for flexibility. It is also desirable to reduce constraints in order to maximize turbine utilization and thereby increase their output value. The production of green hydrogen and green ammonia from electrolysis could be a sustainable alternative for this purpose. This study aims to analyse the potential role that green hydrogen and green ammonia can play in decarbonizing the energy system and examine its benefits and challenges.[8]

Keywords:

Offshore electrolysis, green hydrogen, green ammonia, energy storage.

Innehåll

1	Introduktion.....	6
1.1	Översikt av Parisavtalet och EU:s klimatmål	7
1.2	Den europeiska gröna given	7
1.2	EU:s offshoreenergi strategi	8
2	Offshore elektrolys.....	10
2.1	Teori om vattenelektrolys	10
2.2	Vind elektrolys.....	13
3	Framtida bränslen kopplade till väte.....	14
3.1	Grönt väte.....	16
3.2	Kommersiella tekniker för vätegenerering.....	18
3.3	Vätelagring.....	22
3.4	Dom senaste innovationerna för vätelagring	24
3.5	Ammoniak	27
4	Nya ammoniakgenereringsätt	28
4.1	Lagring av ammoniak	28
5	Ekonomisk analys för väte och ammoniakproduktion	32
6	Sammanfattning	34
	Källor.....	36

Förord

Denna rapport är mitt examensarbete på utbildningsprogrammet Energi- och miljöteknik vid yrkeshögskolan Aracada i Helsingfors. Rapporten motsvarar 15 studiepoäng.

Helsingfors, mars 2024

Lars Koponen

1 Introduktion

Utvecklingen av offshorevind har tills vidare främst varit koncentrerad till de mest gynnsammaste projekten nära kusten. Med den pågående snabba tillväxten inom offshorevind behöver vi numera nå svåråtkomliga och djupare havsområden, vilket medför nya utmaningar samt ökade kostnader. En av de främsta kostnaderna för avlägsna vindkraftverk relaterar till deras anslutning till nätet och överföringen av energi till marknaden, vilket vanligtvis sker genom högspänningskablar (HVDC). Dessa infrastrukturinvesteringar är känsliga för både avstånd och kapacitet samt kräver stora kapitalinsatser. Inom en marknad där efterfrågan på väte (H^2) ökar, kan produktion av väte från offshore vind ha flera fördelar. Offshore H^2 -produktion kan tillse lokal flexibilitet till havs, vilket minskar avbrott och optimerar användningen av både vindkraftverk och HVDC-kablar. Därutöver är rörledningar generellt sett betydligt mer kostnadseffektiva per energienhet i jämförelse med HVDC-ledningar när det gäller transport av stora energimängder. Om efterfrågan på väte är tillräckligt stor kan användningen av offshore elektrolys och väteledningar minska kapacitetsbehovet för HVDC-kablar, vilket möjliggör utvinning av havsbaserad energi på storskalig nivå från avlägsna platser till lägre kostnader och med färre begränsningar. Grön ammoniakproduktion inom samma sammanhang kan också vara ett bra alternativ till väteproduktion. Ammoniak erbjuder billigare lagring än väte, tack vare dess högre volymetriska energitäthet. Väte har däremot fördelen att det kan utvinnas omedelbart, samt erbjuda bredare tillämpningsområden. En annan aspekt att beakta när det gäller ammoniakproduktion är förekomsten av ammoniakutsläpp, som kan orsaka betydande miljö- och hälsokonsekvenser jämfört med väte.[8]

1.1 Översikt av Parisavtalet och EU:s klimatmål

Parisavtalet är en internationell juridiskt bindande överenskommelse om klimatförändringar. Avtalet antogs av 196 länder vid FN:s klimatkonferens (COP21) i Paris, Frankrike, den 12 december 2015, och trädde i kraft den 4 november 2016. Dess övergripande mål är att hålla den globala medeltemperaturen väl under 2 grader Celsius över det förindustriella genomsnittet och sträva efter att begränsa temperaturökningen till 1,5 grader Celsius över det förindustriella genomsnittet från perioden 1850–1900, innan den omfattande användning av fossila bränslen tog fart.

Under de senaste åren har ledare över hela världen betonat behovet av att begränsa uppvärmningen till under 1,5 grader Celsius före slutet av århundradet (2100). Detta beror på att FN:s mellanstatliga panel för klimatförändringar indikerar att passerandet av 1,5 graders-tröskeln riskerar mycket grövre effekter till följd av klimatförändringen, som till exempelvis ökad frekvens av torra, värmeböljor och nederbörd.

För att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5 grader Celsius måste utsläppen av växthusgaser nå sin topp senast 2025 och minska med 43% till 2030.

Parisavtalet markerar en milstolpe i den multilaterala processen för att hantera klimatförändringar eftersom det är det första bindande avtalet som omfattar alla länder.[1]

1.2 Den europeiska gröna given

Den europeiska gröna given trädde i kraft år 2020 som ett resultat av Parisavtalet 2016 och utgör ett omfattande paket med politiska initiativ. Syftet är att leda EU mot en grön omställning genom att minska nettoutsläppen av växthusgaser med minst 55% fram till 2030 jämfört med nivåerna från 1990. Det slutgiltiga målet är att EU ska vara klimatneutralt senast år 2050.

Planen innebär en översyn av varje befintlig lagstiftning för att bedöma dess klimatmässiga fördelar. Dessutom kommer nya lagar att införas inom områden såsom cirkulär ekonomi, renovering av byggnader, biologisk mångfald, jordbruk och innovation. Det övergripande målet är att främja hållbara metoder och teknologier samt att skapa en ram för att stödja en hållbar och konkurrenskraftig ekonomi inom EU.

[2][3][4]

EU planerar att finansiera den politik som införs i den gröna given genom en investeringsplan Invest EU, som förutspår minst en biljon euro i investeringar. Dessutom beräknas det att cirka 260 miljarder euro i investeringar per år kommer att krävas fram till 2030, för att EU ska nå sina mål enligt avtalet.[5]

Inom ramen för Parisavtalet har EU redan år 2019 minskat sina utsläpp med 25% jämfört med 1990 års nivåer, vilket innebär att med dagens utsläpp som baslinje har EU uppnått en minskning på 40% av sitt mål på 55% med 1990 som utgångspunkt. Detta kan beräknas med följande ekvation:

$$\left(\frac{0.55 - 0.25}{1 - 0.25} \right) = 0.40 = 40\%$$

Enligt FN:s miljöprogram Emissions Gap Report 2020 krävs för att Parisavtalets mål om en temperaturhöjning på 1,5°C ska uppnås en global minskning av utsläppen med 57% från nivåerna år 2019 till 2030, vilket är långt över det mål på 40% som fastställts i det europeiska gröna avtalet. Målet om en minskning av utsläppen med 57% till 2030 representerar genomsnittliga globala minskningar, med förväntan om att avancerade ekonomier ska bidra mer. [6][7]

1.2 EU:s offshoreenergistrategi

Europeiska kommissionens EU-strategi för förnybar energi till havs, publicerad den 19 november 2020, är en viktig del av den övergripande europeiska gröna given. Strategin syftar till att avsevärt öka EU:s produktion av el från havsbaserade förnybara energikällor, från den nuvarande kapaciteten 12 gigawatt (GW) till över 60 GW år 2030, och 300 GW år 2050. För att uppnå detta mål identifierar strategin olika tekniker såsom havsbaserad vindkraft, tidvatten- och vågkraft, flytande solceller och användning av alger för produktion av biobränslen. Den betonar betydelsen av att främja investeringar och underlätta för investerare genom att öka säkerheten och minska riskerna. För att nå detta mål är det viktigt att tillföra både offentlig och privat finansiering. Utöver krävs regionalt samarbete för att utveckla förnybar energi till havs inte bara i Nordsjön, utan även i andra havsbassänger och regioner som Atlanten, Östersjön, Medelhavet, Svarta havet och de yttersta randområdena, inklusive

utomeuropeiska territorier. Strategin pekar också på vikten av att lösa komplexa frågor såsom samspelet mellan havsbaserad energiproduktion och andra maritima industrier som fiske, samt att stärka försörjningskedjorna och stödja kontinuerlig innovation inom sektorn. När det gäller finansiering framhåller strategin betydelsen av olika EU-program och initiativ såsom Connecting Europe Facility, Horizon Europe och Invest EU, samt nästa generations EU:s återhämtningsplan, särskilt faciliteten för återhämtning och motståndskraft (RRF). Kommissionen har även föreslagit lagstiftning för att revidera direktivet om förnybar energi, vilket inkluderar bestämmelser för att öka samarbetet mellan medlemsstaterna och främja användningen av förnybar energi till havs. Nyligen antog Europaparlamentet en resolution om strategin för förnybar energi till havs, där ITRE-utskottet spelade en viktig roll och föredraganden Morten Petersen (PPE, Danmark) ledde arbetet. Slutrapporten godkändes i ITRE-utskottet den 6 december 2021 och antogs sedan vid plenarsessionen den 15 februari 2022.[9]

2 Offshore elektrolys

Elektrolys är en elektrokemisk process där elektrisk energi driver kemiska reaktioner för att bryta ner ämnen. Detta fenomen upptäcktes för första gången redan 1789, men det var först på 1800-talet som Nicholson och Carlisle utvecklade tekniken och började utforska dess potential. Under början av 1900-talet fanns det redan 400 industriella vattenelektrolysanläggningar i drift.

I en elektrolysreaktion sönderdelas vatten till väte och syre när en elektrisk ström passerar genom det i närvaro av elektrolyter. Positivt laddade vätejoner vandrar till den negativt laddade katoden, där de reduceras för att bilda väteatomer som sedan förenas till vätemolekyler (H_2). Samtidigt bildas syre vid den positivt laddade anoden. För att undvika oönskade reaktioner och föroreningar i vätgasen är det avgörande att använda lämpliga elektroder och separationsmembran i elektrolysenheten.

Tidigare användes sura vattenlösningar som elektrolyter, men numera har en trend uppstått emot alkaliska elektrolyter som kaliumhydroxid (KOH). Detta ger fördelar såsom minskad korrosion och ökad hållbarhet hos materialen som används.

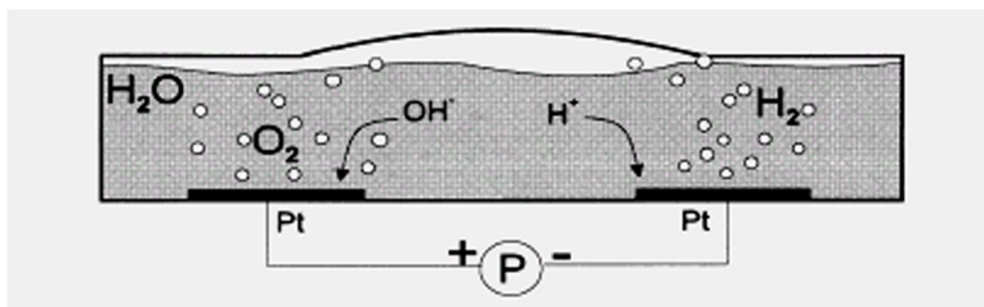
Elektrolysanläggningar arbetar vanligtvis vid förhöjda temperaturer och normalt eller något förhöjt tryck för att uppnå önskad effektivitet.

Trots teknologiska framsteg utgör vattenelektrolys idag endast en liten del av världens vätgasproduktion, främst på grund av dess höga energiförbrukning och investeringskostnader. Pågående forskning och utveckling utforskar möjligheter att öka effektiviteten, inklusive högre processtemperaturer och användning av förnybara energikällor som sol-, vind- och vattenkraft. Detta öppnar upp för nya möjligheter att producera vätgas på ett mer hållbart och miljövänligt sätt, vilket kan spela en viktig roll för framtida energisystem och klimatåtgärder.[10]

2.1 Teori om vattenelektrolys

Teorin om vattenelektrolys ger en djupare förståelse för de grundläggande principerna bakom produktionen av syre och vätgas genom elektrokemiska processer. I Figur 1 presenteras en schematisk bild av en elektrokemisk cell, som utgör kärnan i en elektrolysapparat. Denna cell är fylld med rent vatten och innehåller två elektroder som

är anslutna till en extern strömkälla. När en kritisk spänning uppnås mellan dessa elektroder, börjar vätgas bildas vid den negativt laddade elektroden, även känd som katoden, medan syrgas bildas vid den positivt laddade elektroden, anoden. Mängden gas som produceras per tidsenhet är direkt proportionell mot den elektriska ström som passerar genom cellen.



Figur 1. [10]

I vattenlösningar sker en delning av vattenmolekyler till joner, inklusive H^+ och OH^- .

Denna jämvikt illustreras i ekvation (1). $H_2O(l) \leftrightarrow H^+(aq) + OH^-$

Syre och vätgas genereras vid ädelmetallelektroder enligt ekvationerna (2a) $4OH^- \leftrightarrow$

$2H_2O + O_2 + 4e^-$ och (2b) $2H^+(aq) + 2e^- \leftrightarrow H_2(g)$, med små variationer i sura

eller basiska miljöer. En anmärkningsvärd egenskap hos vattenelektrolys är frånvaron

av sidoreaktioner som kan ge upphov till oönskade biprodukter, vilket resulterar i den

nettobalans som uttrycks i ekvation (3). $2H_2O \rightarrow (4e^-) \rightarrow O_2 + 2H_2$

Den minsta spänningen som krävs för att starta elektrolysen, E^o_{cell} , bestäms under

standardförhållanden enligt ekvation (4), $E^o_{cell} = -\Delta G^o/nF$

där ΔG^o representerar förändringen i Gibbs fria energi och n antalet överförda

elektroner. Vid övergång från öppna till slutna cellförhållanden görs justeringar, där

ΔA^o representerar Helmholtz fria energi. Den spänning som krävs för att övervinna

Helmholtz energibarriären ges av ekvation (5), $E^o_{cell} = -\Delta A^o/nF$

där ΔA^o beräknas enligt ekvation (6). $\Delta A^o = \Delta H^o - TR\Delta n - T\Delta S^o$

För vattenelektrolys används standardvärden för entalpi och entropi, vilket resulterar i

en minsta cellspänning på 1,21 V. Under standardförhållanden är cellspänningen 1,23

V, vilket återspeglar förändringen i Gibbs fria energi (ΔG^o).

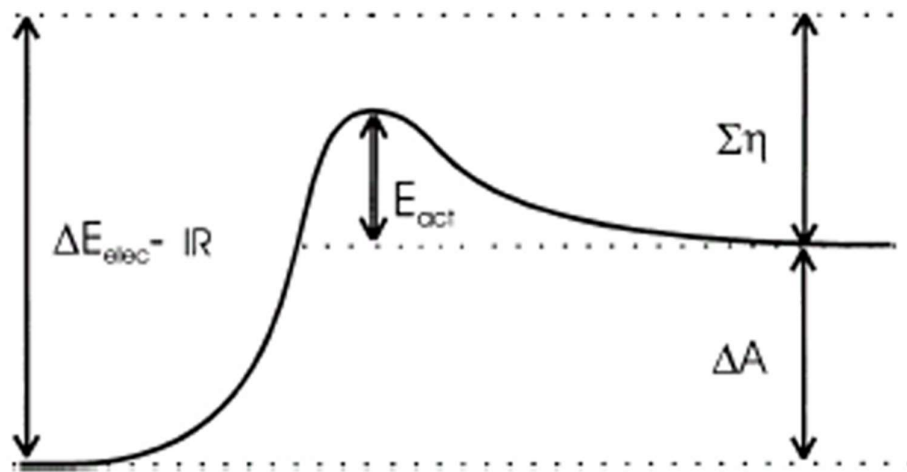
För att initiera en reaktion krävs det att en ytterligare energibarriär övervinns, vilken kallas aktiveringsenergi (E_{act}). Reaktionshastigheten styrs av antalet molekyler som övervinner denna barriär, enligt Maxwell-Boltzmanns relation.

Den maximala effektiviteten för en ideal elektrokemisk cell bestäms av ekvation

$$(7), \epsilon_{max} = \Delta H / \Delta A = -\Delta H / nFE_{cell}$$

medan faktorer som ohmskt motstånd och överpotentialer bidrar till den faktiska effektiviteten, enligt ekvation (8). $\epsilon_{real} = -\Delta H / nE_{elec}$.

Figur 2 illustrerar energibalansen vid vattenelektrolys, där aktiveringsöverpotentialen minskar genom faktorer som strömtäthet och elektrodens katalytiska aktivitet.



Figur 2. [10]

Under idealiska reversibla förhållanden närmar sig den maximala teoretiska verkningsgraden 120 %, vilket indikerar att värme flödar in i cellen från omgivningen. För att uppnå 100% effektivitet krävs en termoneutral potential på 1,48 V, där värmeproduktionen balanserar värmeabsorptionen. Praktiska överväganden, inklusive minimering av överpotentialen samtidigt som effektiviteten maximeras, kräver noggrann optimering av elektrodernas kontaktytor.

Sammanfattningsvis ger förståelsen av teorin bakom vattenelektrolys insikter som är avgörande för att optimera effektivitet och prestanda i praktiska tillämpningar.[10]

2.2 Vind elektrolys

Medan solcellssystem har dominerat forskningen om vätgasproduktion har integrering av elektrolysörer med vindturbiner fått uppmärksamhet, om än i mindre utsträckning. Anmärkningsvärda projekt, som till exempel den vinddrivna vätgasanläggningen vid ENEA:s forskningscenter Casaccia i Italien, har demonstrerat detta koncept. Dessa system integrerar vanligtvis vindturbiner, elektrolysörer, DC-DC-omvandlare och batterilagring.

Valet av elektrolysör, till exempel modellen från von Hoerner System GmbH, görs ofta utifrån ekonomiska överväganden. Man har dock stött på problem som att upprätthålla det interna trycket under standby-läge och föroreningsnivåer i gasproduktionen. Trots insatser för att hantera dessa utmaningar är den totala effektiviteten i cellstacken fortfarande lägre jämfört med alternativa elektrolysörmodeller.

I system som det vid Quebecs universitet i Trois-Rivieres utnyttjar en omfattande installation vind- och solenergi för produktion, lagring och användning av vätgas genom bränsleceller. Operativa utmaningar, såsom begränsad strömtillgänglighet jämfört med nominella värden och kompressorns startfrekvens, illustrerar dock komplexiteten i att uppnå effektiva fristående kraftsystem.

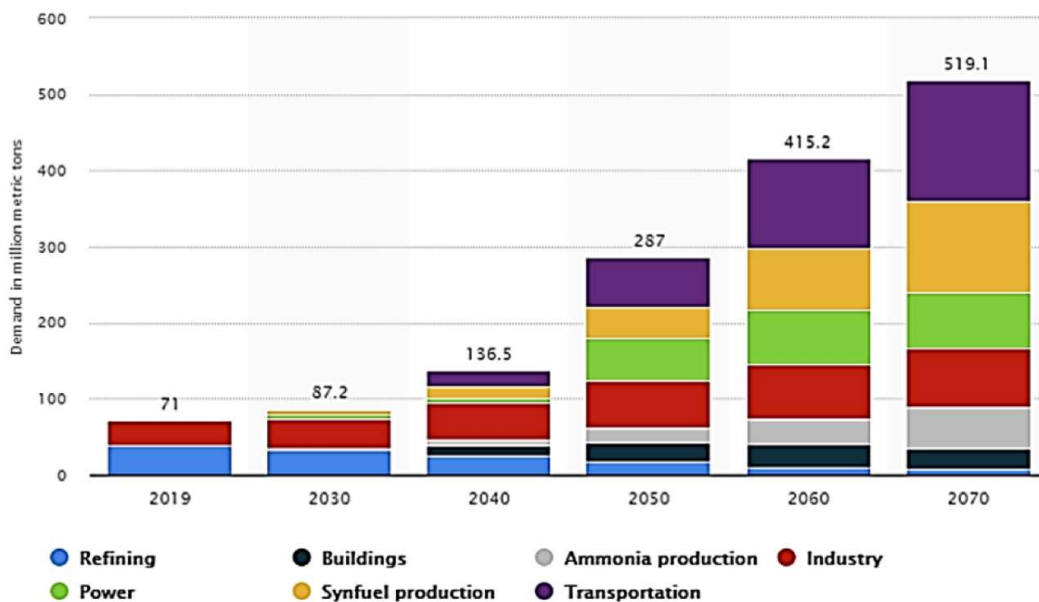
På samma sätt använder systemet vid Stralsunds tekniska högskola vindkraftverk och alkaliska elektrolysörer för produktion och lagring av H^2 . Även om strategier för driftkontroll implementeras, är den direkta anslutningen mellan elektrolysören och vindturbinen inte tydligt demonstrerad i de rapporterade resultaten.

Dessa system visar på olika sätt att integrera vindelektrolys, vilket understryker behovet av ytterligare forskning och utveckling för att hantera tekniska utmaningar och optimera prestanda för decentraliserade energilösningar. [10]

3 Framtida bränslen kopplade till väte

I takt med global befolkningsökning och fortsatt industrialisering, ökar också energibehovet. Tyvärr har vårt starka beroende av konventionella energikällor, som kol och olja, en betydande miljöpåverkan genom utsläpp av växthusgaser och luftföroreningar. För att mildra dessa effekter och uppnå långsiktig hållbarhet är det nödvändigt att prioritera gröna energialternativ. Bland dessa alternativ har både väte och ammoniak visat sig vara lovande kandidater för att omforma energilandskapet. [11]

Vätgas är en mångsidig energibärare med potential att revolutionera vår energiförsörjning och främja hållbar utveckling. Dess fördelar inkluderar möjligheten till integration med olika energisystem, användning som bränsle eller i blandning med naturgas för att underlätta övergången till gröna alternativ. Dessutom kan vätgas kombineras med förnybara energikällor för att lagra överskottsel och därigenom minska problemen med intermittens i förnybar energiproduktion. Prognoser indikerar en betydande ökning av den globala efterfrågan för vätgas fram till 2070, särskilt inom transportsektorn där övergången från konventionella bränslen accelererar. [11]

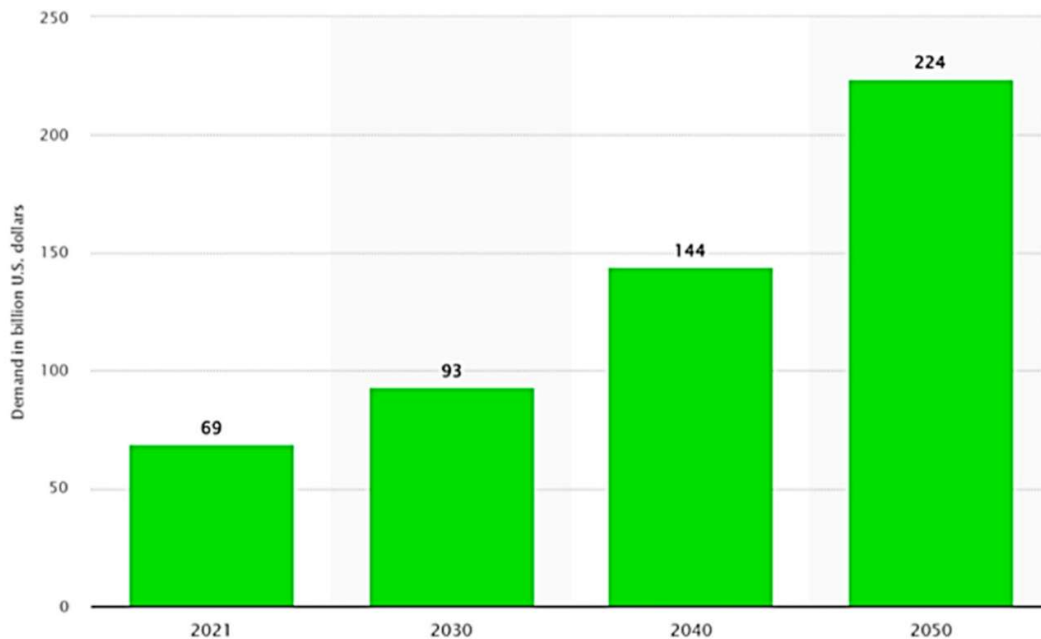


Figur 3. Enligt ett hållbart tillväxtscenario presenteras den beräknade globala efterfrågan på väte per sektor, som sträcker sig från 2019 till 2070, i miljoner ton. [11][12]

Ammoniak, som är en viktig komponent i väteekonomin, står också inför miljöutmaningar. Trots att tidigare ha hyllats som ett grönt bränsle, fortsätter ammoniak

vara energikrävande att producera och använda. Med tanke på dess omfattande användning inom olika industrier, särskilt inom jordbruket, är det viktigt att utveckla mer hållbara produktionsmetoder. Forskning har identifierat nya katalysatorer och processer som kan minska energikraven och därmed miljöpåverkan av ammoniakproduktionen.

Det växande fokuset på att minska koldioxidutsläppen har drivit utvecklingen av gröna väte- och ammoniakteknologier runt om världen. Studier har påvisat potentialen för dessa gröna bränslen från förnybara källor, med tekniska och ekonomiska fördelar. Genom att utforska möjligheterna med flexibla produktionsprocesser och utveckla nödvändig infrastruktur kan länder som Chile, Argentina och Marocko bli ledande producenter och exportörer av grönt väte och ammoniakprodukter. [11]

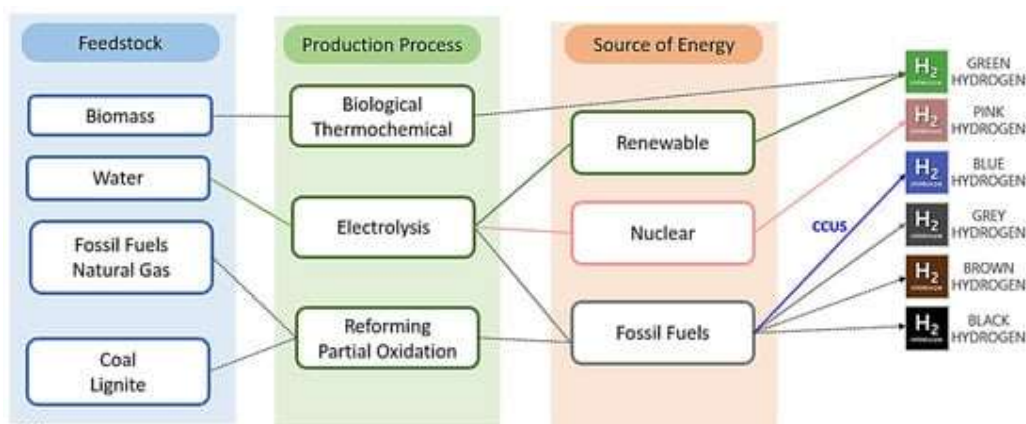


Figur 4. Beräknad global efterfrågan på ammoniak från 2021 till 2050 (i miljarder dollar). [11][13]

Investeringar i gröna väte- och ammoniakproduktionsteknik är av central betydelse för att driva den gröna energiomställningen framåt. Dessa bränslen har en enormt potential över flera sektorer, inklusive energiproduktion, transport, tillverkning och jordbruk. Genom att inkorporera teknologier som artificiell intelligens och 3D-utskrift kan man ytterligare förbättra effektivitet och hållbarhet när det kommer till väte-och ammoniakproduktion, och därigenom uppnå en mer hållbar energiframtid. [11]

3.1 Grönt väte

En framtid där ren och hållbar energi är rikligt och vårt beroende av fossila bränslen har ersatts av gröna alternativ är grunden för den innovativa klassificeringen av väteproduktion baserad på färger, känd som ”vätefärger” (se Figur 5). Detta tillvägagångssätt möjliggör en tydlig distinktion mellan olika väteproduktionsmetoder utifrån deras miljöpåverkan.



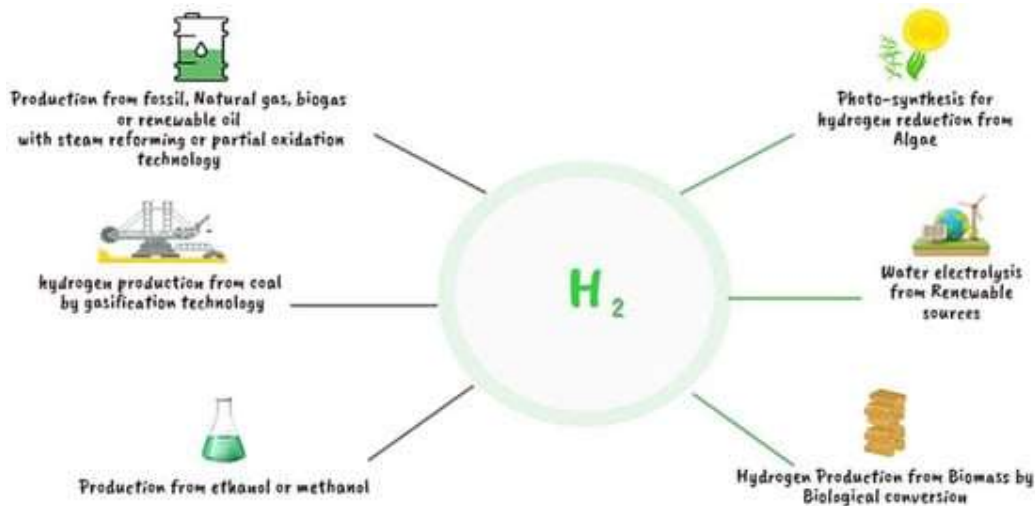
Figur 5 ”vätefärger”. [11]

Bland dessa färger lyser grönt väte starkast. Det produceras genom elektrolys av vatten med hjälp av förnybara energikällor som sol- eller vindkraft. Denna process genererar inga koldioxidutsläpp och innebär ett lovande steg mot en hållbar energiframtid. Å andra sidan representerar grått väte den traditionella och kolintensiva metoden för väteproduktion. Grått väte härleds från fossila bränslen och resulterar i betydande utsläpp av koldioxid i atmosfären.

Klassificeringen av väteproduktion med färger belyser de olika vägarna mot en renare energiframtid och uppmuntrar oss att prioritera grönt väte och fortsatt forskning och utveckling inom detta område. Genom att adoptera grönt väte kan vi låsa upp en värld av möjligheter där hållbar energi driver våra industrier, transporter och bevarar vår planet för kommande generationer.

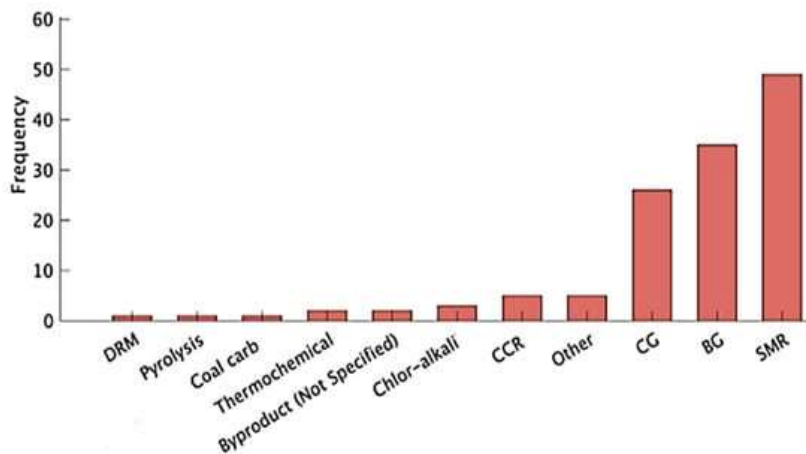
Väte är ett av de vanligaste grundämnena i vårt universum och står som det första elementet i det periodiska systemet. Att utvinna rent väte är emellertid en komplex

process, då det vanligtvis består bundet till andra element, såsom syre i vatten eller kol i metan (CH₄), etan (C₂H₆) eller polypropen (C₃H₆), och så vidare. I figur 6 [11][14][15] illustreras de olika teknikerna som används för att producera både hållbart och icke-hållbart väte. [11]



Figur 6.

I Figur 7 presenteras frekvensen av användningen av olika produktionsmetoder för väte i industriella sammanhang, där ångreformering av kolbaserade föreningar är den mest vanligaste metoden. [16][11]



Figur 7.

Senaste översikter [11][17][18] har omfattat de flesta typer av väteproduktion från förnybara energikällor, såväl som väteproduktion från fossila källor, vars kommersiella metoder sammanfattas i tabell 1. Denna jämförelse visar att allt väte inte produceras på

samma sätt, utan däremot finns en mängd olika tillvägagångssätt (grå,turkos,rosa,blå och grön) [11][19]. Trots denna mångfald i produktionskällor används fortfarande grått, blått och grönt väte som de mest dominerande metoderna inom forskning och industri. [11]

Tabell 1.[11] kommersiella metoder för väteproduktion.

Teknik	Råmaterial	Temperatur (°C)	Renhetsgrad	Energikälla	Verkningsgrad (%)	Färg	Beskrivning	Referenser
Ångreforming/kommersiell	Naturgas/tunga kolväten	700	Kvasi-ren med koldioxidinfångning och lagring	Värme	85	Grå/blå	Vätgasproduktion genom metanreforming, reformering med (H ₂ O/CH ₄ = 1,50)	[54,55]
Partiell oxidation/kommersiell	Tunga kolväten/naturgas	523–593	Ej ren, med utsläpp	Värme	95	Grå	Vätgasproduktion via metanolreforming med (Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ -katalysator)	[54,55, 56]
PEM/kommersiell	Vatten	20–200	Ren, utan utsläpp	Elektrisk	67–82	Grön	Vätgasproduktion via fast polymerelektrolyt -Anod: IrO ₂ -Katod: Pt/C	[54,55, 56,57]

3.2 Kommersiella tekniker för vätegenerering

Ångreforming innebär att naturgas och vattenånga omvandlas till väte och kolmonoxid genom en endoterm process. Partiell oxidation, å andra sidan, produceras väte genom att delvis förbränna kolväten, vilket frigör värme som bidrar till att uppehålla reaktorns temperatur. Elektrolys av protonbytesmembran (PEM) använder ett surt polymermembran för att separera väte från syre i vatten med hjälp av en elektrisk ström.

Framsteg inom väteproduktionsprocesser inkluderar teknologier som C-Zero-processen, som producerar turkost väte och fast kol från naturgas genom termokatalys. Guldväte, som utvecklats av Cemvita utvinns från utarmade oljereservoarer med hjälp av mikrober som bryter ned kvarvarande olja till väte och koldioxid. Antennreaktorn, utvecklad av Rice University, använder koppar-järnkatalysatorer för att omvandla ammoniak till väte med hjälp av ljus i stället för värme. HYSATA- teknologin, utvecklad av Korean Institute of Science and Technology, uppnår hög effektivitet vid elektrolys genom att använda en porös hydrofil separator och kapillärverkan.

Andra innovativa tillvägagångssätt inkluderar DEA-teknik, som producerar väte direkt från luftfuktighet med hjälp av en elektrolysator, och gallium-aluminiumkompositteknik, som reagerar med vatten för att producera väte vid rumstemperatur. SRBW-teknik, utvecklad av RMIT University, förbättrar elektrolyseffektiviteten genom att använda ljudvågor för att bryta ner vattenmolekyler. Solhyde Technology utvecklar vätepaneler som producerar väte från luftfuktighet med hjälp av solljus och en fotokatalysator. Följande tabell sammanfattar fördelarna och nackdelarna med dessa senaste framsteg, och ger insikter om deras styrkor och begränsningar. [11]

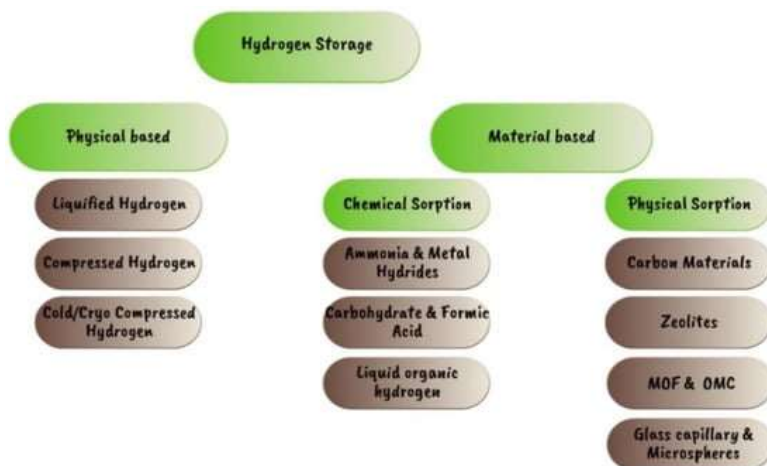
Tabell 2 [11] Dom senaste framsteg för vätegenerering.

Teknologi	Fördelar	Nackdelar	Ref
C-Zero-processen	- Möjliggör produktion av turkost väte och fast kol utan CO ₂ -utsläpp. Bidrar till gröna energimål. Erbjuder en 75% minskning av utsläpp jämfört med traditionella metoder.	- Potentiella metanläckor under distributionen. Kräver ytterligare utvärdering av effektiviteten för mikrobiell nedbrytning.	[65,66 ,67,68 ,69]
Guldväte	- Erbjuder potentiella fördelar för koldioxidneutralitet och förlängning av livslängden för oljekällor. Använder befintliga oljeresurser.	- Genererar CO ₂ -utsläpp, vilket kräver hantering och åtgärdsstrategier. Effektiviteten för mikrobiell nedbrytning behöver utvärderas.	[70,71,72]
Tennreaktornan	- Använder nanomaterialkatalysatorer för ren väteproduktion med hjälp av ljus. Kostnadseffektiv konstruktion med prisvärda råmaterial.	- Utmaningar vid praktisk implementering kan uppstå trots lovande initiala resultat.	[58]
Hysata	- Möjliggör direkt produktion av väte och syre utan bildning av luftbubblor. Erbjuder betydligt högre effektivitet jämfört med kommersiella elektrolysatorer.	- Kräver stora mängder rent vatten, vilket innebär utmaningar i vattenfattiga områden. Begränsningar i effektivitet och produktivitet jämfört med andra metoder.	[59,60]
DAE	- Extraherar väte direkt från luften, vilket eliminerar behovet av färskvattenkällor. Samlar fukt även vid låga luftfuktighetsnivåer.	- Begränsad effektivitet och produktivitet jämfört med andra metoder.	[61]
Gallium-aluminiumkomposit	- Producerar väte från vatten vid rumstemperatur utan ytterligare energikällor. Tillämplig på olika vattenkällor.	- Utmaningar i galliumtillgänglighet och kostnad kan påverka ekonomisk livskraft. Förmågan till storskalig implementering behöver utvärderas.	[62]
SRBW	- Använder ljudvågor för att bryta ner vatten, vilket minskar energiförbrukningen. Erbjuder potential för betydande energibesparingar.	- Kräver ytterligare forskning om skalbarhet och praktisk implementering. Behov av att hantera potentiella utmaningar och begränsningar.	[63]
Solhyde	- Möjliggör decentraliserad väteproduktion med solljus och luftfuktighet. Låga driftskostnader och minskad miljöpåverkan.	- Kräver optimering för effektivitet och skalbarhet avseende hållbarhet, kostnad och integration.	[64]

3.3 Vätelagring

Att lagra vätgas är en av de mest utmanande aspekterna med vätegenerering. Vätgas förvaras vanligtvis i speciella material och högtryckstankar, som används till exempel i fordon som bilar och tåg. Dessa tankar är stora och dyra att tillverka, samt svåra att återvinna och använda för långtidsförvaring. Därför arbetar forskare runt om i hela världen för att tackla dessa utmaningar och utnyttja väte fullt ut. Trots dessa stora svårigheter kan väte lagras i olika former, inklusive gas, flytande och ibland fast, vilket gör lagringen ännu mer komplex.

Dom vanligaste metoderna för vätelagring visas i figur 8 [20,21]. Komprimerad gas och kryogenvätska är de två huvudsakliga metoderna som används idag. Metall- eller kompositcyndrar används i olika storlekar och kapaciteter för att lagra komprimerad vätgas. Gasen komprimeras ofta till tryck mellan 350 och 700 bar, vilket kräver betydande energiinsatser. Dessutom utsätter det höga trycket behållarmaterialen för slitage och riskerar att orsaka haverier över tid. Kryogent lagrat väte förvaras vid extremt låga temperaturer (-253C) i specialdesignade behållare för att minimera värmeöverföring. Även om denna metod har högre energitäthet än komprimerad gas, är kryogena lagringssystem komplexa och dyra. Risken för kvävning och köldskador kräver noggrann hantering och förvaring av kryogena vätskor. Kemisk lagring i metallhydrider, kemiska hydrider och ammoniak övervägs också som alternativ för vätelagring. Dessa tekniker har potential att erbjuda högre energitäthet och lägre driftstryck än lagring av komprimerad gas, med de har likväl egna tekniska och ekonomiska utmaningar [22].



Figur 8.

För att förvara vätgas krävs robusta material som kan motstå höga tryck och förhindra läckage. Vanligtvis använda material för design av vätelagringstankar inkluderar metaller, polymerer och kolfiber. Kompositmaterial, såsom kolfiber förstärkta polymerer (CFRP), har en viktig roll inom den gröna väte- och ammoniakindustrin. Dessa material tillämpas ofta för att konstruera tryckkärl som används för lagring av väte och ammoniak. Dessa tryckkärl kräver material med hög hållfasthet för att tåla höga tryck och motstå penetrering av väte och ammoniak. Kompositmaterial som CFRP är idealiska för detta ändamål på grund av deras höga hållfasthet, viktförhållande och utmärkta motstånd mot penetration [23,24,25,26,27]. Väte integrerar också med lagringsmaterial och kan orsaka kemiska och fysikaliska effekter såsom sprödhet och korrosion. Förståelsen för dessa interaktioner är avgörande för att välja lämpliga material för vätelagring [28]. Resultaten från olika studier som undersöker dessa interaktioner sammanfattas i tabell 3 [28].

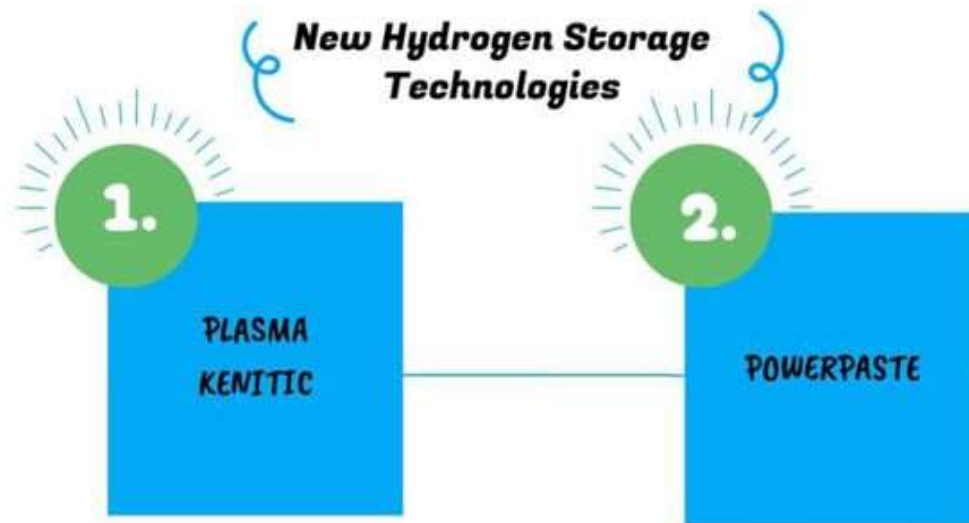
Tabell 3 [11] Jämförelse av olika vätgaslagrings material.

Material	Mekanismer	Referens
Rostfritt stål	Väte diffunderar in i korngränserna och blandas med kol för att bilda metangas, vilket ökar systemtrycket och leder till sprickbildning.	[29]

Kolstål	Väteinförsel i materialet försämrar dess mikromekaniska egenskaper. Övergången från duktil till sprött brott inträffar. Diffusion av väte förstärker lokal plastisk deformation och separation av materialet.	[30]
Aluminium och aluminiumlegeringar	På grund av låg löslighet för väte i aluminium vid låga temperaturer orsakar vätgasflöde till gjutdefekter och droppar sprickbildning.	[31]
Koppar och kopparlegeringar	Sprickor och blåsor bildas när väte diffunderar in i syrehaltig koppar och kopparlegeringar som glödgats i en vätgasmiljö. Detta minskar materialets brottseghet och duktilitet.	[32]
Nickel och nickelbaserade legeringar	Väteadsorption vid brottspetsar i nickel och nickelbaserade material accelererar sprickpropagering i vätgaslösningar.	[33]

3.4 n Dom senaste innovationerna för vätelagring

Tekniken för vätelagring utvecklas kontinuerligt för att möta den ökande efterfrågan på rena och hållbara energilösningar. Två betydande innovationer inom detta område är den revolutionerande vätelagringstekniken utvecklad av Plasma Kinetics och Leibniz Institute. Dessa tekniker, som beskrivs i figur 9, har potential att förändra olika industrier och leda vägen mot en vätgasdriven framtid.

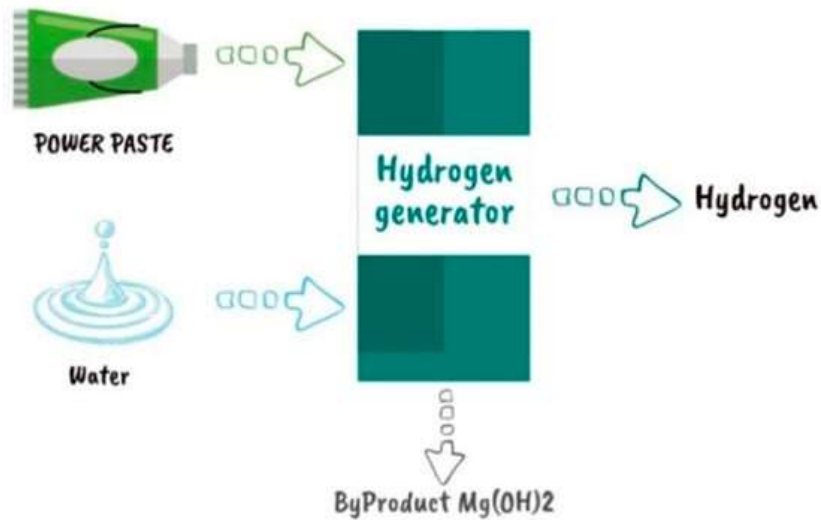


Figur 9 [11]

Plasma Kinetics: är en innovation som representerar det första vätebaserade energisystemet som erbjuder kolfri energiavskiljning, lagring och transport. Tekniken innefattar en lusaktiverad film i nanoskala som är nio till tio gånger tunnare än ett hårstrå men kan absorbera väte från luften vid låga temperaturer och tryck. Denna lagringsmetod är billigare än traditionella metoder och kräver endast ljus för att extrahera väte från filmen, liket sedan lagras i en intern grafitbaserad struktur. Tekniken kan fånga upp 99,99% rent väte och erbjuda flera fördelar jämfört med alternativa metoder [34].

POWERPASTE: Leibniz Institute for Polymer Research Dresden (IPF) har utvecklat en ny teknik baserad på fast magnesiumhydrid som kallas POWERPASTE. Detta ämne har en vätekapacitet på cirka 10%, vilket innebär att 1kg POWERPASTE väger lika mycket som 10kg väte och kan producera ett effektområde från 100w till 10Kw. Väte frigörs när POWERPASTE kommer i kontakt med vatten och kan användas med en mängd olika vattenkällor, inklusive kranvatten och saltvatten. Tekniken erbjuder flera fördelar, såsom giftfrihet, lång lagringstid och tillverkningskostnad [35]. Delarna i ett POWERPASTE-baserat kraftsystem visas i figur 10 [35].

fördelar, såsom icke giftighet, lång lagringstid och tillverkningskostnad [35]. Delarna i ett POWERPASTE-baserat kraftsystem visas i figur 10 [35].



Figur 10. [11]

Tabell 5 presenterar en jämförelse mellan plasmakinetik och POWERPASTE-teknologierna (34,35), vilket visar deras respektive egenskaper och prestandamått. Utmaningen med att generera och lagra vätgas i stor skala kräver ytterligare forskning och utveckling. Dessa tekniker förväntas dock bli mer tillgängliga och kostnadseffektiva.

Tabell 4 [11] Jämförelse mellan plasmakinetik och POWERPASTE-teknologierna.

Lagring/Funktion	Plasma Kinetics	POWERPASTE	Komprimerad	Flytande	Metallhydrid
Temp/Tryck vid lagring	25 °C/1 bar	Omgivningstryck	25 °C/350–700 bar	–252,87 °C/1 bar	+175 °C/20 bar
Energi	8,7 kWh/kg	1,6 kWh/kg	1,8–6,5 kWh/kg	11,5 kWh/kg	34,8 kWh/kg
Brandfarlighet	Icke brandfarlig	Icke brandfarlig	Brandfarlig	Brandfarlig	Brandfarlig
Explosivitet i luft	Icke explosiv	Icke explosiv	Explosiv	Explosiv	Icke explosiv
Lagrad molekyl	MgHX Hybrid	MgH ₂	H ₂ kovalent	H ₂ kovalent	MgH ₂ Hybrid

3.5 Ammoniak

Nyare tekniker för ammoniakproduktion har undergått betydande framsteg, med fokus på att göra processen mer effektiv och miljövänlig. Ammoniak, en färglös gas bestående av kväve- och väteatomer, som är en viktig komponent i många industriella processer, inklusive produktionen av gödningsmedel och kemiska produkter.

Ammoniak har traditionellt producerats genom Haber-Bosch-processen, som innebär att kvävgas och vätgas reagerar vid höga temperaturer och tryck med hjälp av en katalysator. Den senaste utvecklingen inom katalysatorteknologin har förbättrat effektiviteten hos denna process genom att möjliggöra lägre drifttemperaturer och tryck. Konventionell ammoniakproduktion kräver användningen av flera katalysator typer för att optimera reaktionsutbytet.

Med det ökande fokuset på hållbarhet har det uppstått en ökad efterfrågan på gröna produktionsmetoder för ammoniak. Dessa metoder, som är inriktade på att integrera förnybara energikällor i processen, har potentialen att minska koldioxidavtrycket från industrin och transportsektorn. Grön ammoniak spelar en viktig roll i att främja övergången till en mer hållbar energiframtid genom att minska beroendet av fossila bränslen. [11]

4 Nya ammoniakgenereringsätt

Elektrokemisk ammoniaksyntes

Elektrokemisk ammoniakproduktion är en innovativ metod som använder vatten som källa för väte i stället för traditionell väteproduktion. Genom denna process kan vatten oxideras vid anoden för att frigöra traditionella protoner som sedan reagerar med kväve vid katoden för att bilda ammoniak. Flera experimentella försök har utförts för att utforska potentialen hos denna metod. [11]

Fotokatalytisk ammoniaksyntes

Användningen av fotokatalysatorer för ammoniaksyntes är ett lovande forskningsområde som har potential att minska användningen av dyra och giftiga katalysatorer. Genom att omvandla ljusenergi till kemisk energi kan fotokatalysatorer driva processen att producera ammoniak från kväve och vatten. Utmaningar som elektrontransport och katalysatorstabilitet måste dock behandlas för att optimera denna metod. [11]

Icketermisk plasmaprocess

Med icke-termisk plasmaprocess avses användningen av joniserad gas för att aktivera kväve och väte och främja bildningen av ammoniak vid lägre temperaturer. Trots framsteg inom denna teknik återstår fler utmaningar innan den kan användas i storskaliga tillämpningar inklusive reaktordesign och katalysatorutveckling.[11]

4.1 Lagring av ammoniak

Det är en intressant tid för ammoniakproduktionen som undergår stora förändringar. Framväxten av nya tekniker erbjuder lockande möjligheter för att göra processen mer hållbar och effektiv. Genom att fortsätta utforskningen och utveckla dessa metoder kan vi främja övergången till en mer hållbar och miljövänlig framtid. Senaste trender inom ammoniaklagringsteknik har uppvisat en ökande efterfrågan på säkra och effektiva lagringsmetoder för denna viktiga kemikalie. Sedan starten av industriell skaltillverkning av ammoniak för nästan ett århundrade sedan har trycktankar i form av sfärer varit det dominerande lagringsalternativet för flytande ammoniak med en

kapacitet på upp till 2000 ton. Inom industrin har dock tankar med betydligt större kapacitet, upp till 50 000 ton, blivit vanligare vid omgivningstryck och $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, dessa placeras i anläggningar och distributionsnav för att möta efterfrågan på storskalig lagring. Tidigare användes enväggstankar på vissa platser, men nuvarande praxis, baserad på kvantitativ riskanalys (QRA), rekommenderar användning av dubbelskaliga (Double Walled Double Integrity - DWDI) tankar för bulklagring för att uppnå en så låg risknivå som rimligt möjligt (As Low As Reasonably Practicable - ALARP). En jämförelse av de vanligaste typerna av lagringstankar och lagringsanläggningar för ammoniak i atmosfären presenteras i Tabell 6 [36]. Vidare transporteras ammoniak ofta över långa sträckor med hjälp av kolstålrör, vilket erbjuder en relativt energieffektiv metod. För att transportera ammoniak över en sträcka på 1610 km krävs endast 1119 kJ/kg- H_2 , vilket är avsevärt lägre än de 14 814 kJ/kg- H_2 som krävs för vätgastransport. En ny trend inom lagringsteknik för ammoniak är utforskningen av fast form för lagring, vilket har fått ökad uppmärksamhet från forskare och företag. Genom att använda metallaminkomplex kan ammoniak fixeras i fast form för transportapplikationer, vilket adresserar utmaningar som giftighet och transport. Tabell 7 [37] ger en översikt över egenskaperna hos olika metallaminer som kan användas för detta ändamål. Denna framväxande teknik har potential att förbättra säkerheten och effektiviteten hos ammoniaklagring och transport. [11]

Typ av lagringstank	Kommentar	Lagringsanläggning
Dubbelskals stållagringstankar (DWDI) med isolering på utsidan	Dubbelskals- eller dubbelinhägnadstankar är ståltankar med två väggar och perlitolering mellan dem.	För att säkerställa säker drift av flytande ammoniaklagringstankar krävs flera åtgärder: 1. Självstängande ventiler måste installeras på de huvudsakliga in- och utflödesledningarna. 2. Kylsystemet måste vara byggt med robusta och beprövade industriella kompressorer. 3. Automatiska kompressorer kan användas för att reglera
Ståltankar med enkelvägg	Ståltankar med enkelvägg och isolering på utsidan. Betongvallar isolerade med Rockwool eller skumisolering installeras runt vissa av dessa tankar för att hålla innehållet inneslutet.	tanktrycket vid lastning och lossning. Kritiska tjänster bör inspekteras, och viktiga instrument och kontroller bör ha backup. 4. För att minska ammoniakutsläpp bör ett slutet ventilationssystem installeras. Termiska avlastningsventiler ska finnas för att förhindra blockering eller värmegenomträngning. 5. Ett detekteringssystem för ammoniakläckage krävs inuti lagringstanken. 6. Blixt- och jordskydd måste installeras för tanken. En av de kylda kompressorerna måste ha reservkraft för att upprätthålla tanktryck vid strömavbrott. Vid nödsituationer är en fackla nödvändig, och det är lämpligt att ange vindriktningen.

Tabell 5 [11]. En jämförelse av de vanligaste typerna av lagringstankar och lagringsanläggningar för ammoniak i atmosfären.

Tabell 7 [11] Översikt över egenskaperna hos olika metallaminer

Amin-komplex	Densitet (g/cm ³)	Gravimetrisk vätehalt (%)	Ammoniakångtryck vid 25 °C (bar)	Sönderdelningstemperatur (°C)
Sr(NH ₃) ₈ Cl ₂	1,3	8,20	0,554	308
Mg(NH ₃) ₆ Cl ₂	1,16	9,19	0,002	415
Ca(NH ₃) ₈ Cl ₂	1,09	9,78	0,627	305

Mycket forskning krävs ännu för att förbättra denna typ av lagring. Därför borde framtida projekt fokusera på fastform lagring. [11]

5 Ekonomisk analys för väte och ammoniakproduktion

Grönt väte och ammoniak erbjuder lovande förnybara energilösningar med potential att förändra den globala energimarknaden och spela en avgörande roll i att minska växthusgasutsläpp. Att producera grön ammoniak i stor skala är dock fortfarande en ekonomisk utmaning. Den ekonomiska livskraften för teknologier för grönt väte och ammoniak beror på flera faktorer, såsom initiala kapitalinvesteringar, driftkostnader och potentiella kostnadsbesparingar. Trots allt att de initiala investeringskostnaderna för dessa teknologier ofta är höga, vilket i sig självt redan utgör ett hinder för storskalig användning, tenderar deras driftkostnader vara lägre än för traditionella fossila bränslebaserade alternativ. Dessutom kan kostnadsbesparingar uppnås genom användning av grönt väte och ammoniak. En avgörande faktor för respektive ämnes ekonomiska genomförbarhet är priset på grönt väte och ammoniak. Till exempel kan grönt väte separeras från ammoniak och säljas för cirka 1,50 USD per kilogram, jämfört med grönt väte som kan säljas för upp till 15 USD per kilogram [38]. Även om produktionen av grön ammoniak från rent väte både är tekniskt möjligt och ekonomiskt fördelaktigt, är storskalig produktion fortfarande inte lönsamt med de nuvarande ammoniakpriserna, även trots allt de optimistiska väteprisprognoserna [39,40]. Produktionskostnaden för väte varierar beroende på metod; till exempel kostar väte framställt från naturgas cirka 1,50 USD per kilogram, medan rent väte kostar omkring 5 USD per kilogram [41]. USA:s energidepartement har lanserat ett program vid namnet Hydrogen Shot, som syftar till att minska kostnaden för rent väte till 1 USD per kilogram inom ett årtionde [41]. En techno-ekonomisk utvärdering av en grön ammoniakproduktionsanläggning i Chile, följt av transport av ammoniak till Japan, har visat att ammoniakproduktion via elektrolys med solenergi är ekonomiskt genomförbart. Med Kontaks teknologi, som förvärvats av Hydrofuel, kan grön ammoniak produceras till så låga kostnader som 220 USD per ton med elektricitet som kostar 0,02 USD/kWh, medan ammoniak från fossila bränslen för närvarande säljs för 1500 till 2000 USD per ton [38].

När det gäller ekonomin för väteproduktion, finns det flera viktiga punkter att beakta:

- Kostnaden för att producera väte från förnybar elektricitet beräknas minska med 30 % fram till 2030, tack vare fallande priser på förnybar energi och ökande globala policyer och projekt [42].

- Ångreformeringsmetoden av naturgas är fortfarande den mest effektiva och kostnadseffektiva metoden för väteproduktion [43].
- Att använda väte för elproduktion genom elektrolys baserad på förnybar energi är en dyrare lösning [44].
- Den ekonomiska genomförbarheten för produktion av grönt väte har analyserats med hjälp av optimeringsmodeller som tar hänsyn till variabler som kapitalutgifter (CAPEX), kraftköpeavtal (PPA), elektrolysatorer och lagrings-CAPEX, samt totala CAPEX. Resultaten indikerar att grönt väte kan vara konkurrenskraftigt med väte från fossila bränslen under vissa förhållanden [45].
- En omfattande översyn av olika metoder för väteproduktion tyder på att väte är en lovande energibärare med låg eller inga koldioxidutsläpp, med studier som bedömer dess ekonomiska hållbarhet med olika indikatorer och känslighetsanalyser [46].
- I Kalifornien har väteproduktion visat sig vara kostnadseffektiv i jämförelse med andra energikällor, som naturgas, på vissa marknader [47].

Internationella energimyndighetens (IEA) vägkarta för ammoniak-teknologi, som publicerades 2021, undersöker tre möjliga framtidsscenarier för ammoniakproduktion, samtidigt som man siktar på att minska utsläppen från sektorn. Rapporten betonar att ammoniakbehovet kommer växa i framtiden, drivet av en växande global befolkning och ökat välstånd. Den påpekar också att ammoniakproduktion står för cirka 2 % av den totala slutliga energiförbrukningen och 1,3 % av koldioxidutsläppen från energisektorn [48,49]. Nyare studier har utvärderat möjligheten att producera grön ammoniak, som härrör från förnybara energikällor, och blå ammoniak, som produceras från fossila bränslen med koldioxidavskiljning och lagring [50,51]. En techno-ekonomisk utvärdering av ammoniakproduktion via integrerad biomassagaseringsprocess i en befintlig massa- och pappersfabrik har också genomförts, och visar att grön ammoniak kan vara konkurrensförmågigt prissatt i jämförelse med ammoniak från fossila bränslen under vissa omständigheter [52]. Enligt en vägkarta från 2020 om en hållbar ammoniakekonomi kan produktion av förnybar ammoniak spela en betydande roll i att minska det globala beroendet av fossila bränslen [53]. [11]

6 Sammanfattning

Parisavtalet, antaget 2015, syftar till att hålla den globala temperaturökningen under 2°C, och helst under 1,5°C, jämfört med förindustriella nivåer. För att nå detta mål måste växthusgasutsläppen nå dess högsta nivå senast 2025 och minska med 43% till 2030. EU klimatmål, en del av den gröna omställningen, är att minska utsläppen med 55% till 2030 och bli klimatneutrala till 2050. Trots vissa framsteg har EU inte nått det globala målet på 57% minskning till 2030, vilket krävs för att uppfylla Parisavtalets 1,5°C-mål.

I detta sammanhang är EU:s offshore energistrategi en viktig del av den gröna omställningen. Den fokuserar på att öka havsbaserad förnybar energi, särskilt vindkraft, med en kapacitetsökning från 12 GW till 300 GW till 2050. Investeringar och samarbeten mellan medlemsländer är avgörande för att uppnå dessa mål [73].

Väte, en flexibel och hållbar energibärare, har stor potential för att minska växthusgasutsläpp och integreras med förnybara energikällor för att lagra överskottsel och minska intermittens i energiproduktionen. Prognoser indikerar en ökad efterfrågan på väte fram till 2070, särskilt inom transportsektorn. Grönt väte, som produceras genom elektrolys av vatten med förnybar energi, är ett miljövänligt alternativ till grått väte som produceras från fossila bränslen. Nyare teknologier utvecklas för att förbättra väteproduktion och lagring, vilket gör att väte kan lagras som gas, vätska eller i fast form.

Ammoniak, som är en viktig komponent i väteekonomin och används inom jordbruk och andra industrier, står inför miljöutmaningar trots sin breda användning. Traditionell ammoniakproduktion via Haber-Bosch-processen har blivit mer effektiv med hjälp av nya katalysatorer och lägre drifttemperaturer. Det finns även innovativa metoder för ammoniaksyntes, som elektrokemisk ammoniaksyntes och fotokatalytisk ammoniaksyntes, som använder förnybara källor för att minska koldioxidutsläppen. Nyare lagringstekniker för ammoniak, såsom tankar med dubbelskalsstål och forskning kring olika metallaminkomplex, förbättrar säkerheten och effektiviteten vid lagring och transport.

Trots tekniska framsteg är produktionen av grön ammoniak fortfarande ekonomiskt utmanande, främst på grund av höga initiala investeringskostnader. Emellertid har

driftkostnaderna för grön ammoniak och väte potential att bli lägre än fossila alternativ, vilket kan göra dem ekonomiskt konkurrenskraftiga givet att väte- och ammoniakpriserna sjunker. Enligt analyser kan produktion av grön ammoniak bli ekonomiskt genomförbart, exempelvis genom elektrolys med solenergi, vilket kan sänka produktionskostnaden dramatiskt till 220 USD per ton jämfört med 1500–2000 USD per ton för fossila alternativ.

Framöver förväntas vätekostnader minska med 30% till 2030, tack vare billigare förnybar energi och globala projekt. Ångreformerings av naturgas är fortfarande den billigaste väteproduktionsmetoden, medan förnybar väteproduktion är dyrare. I vissa områden, som Kalifornien, är väteproduktion redan kostnadseffektiv. Den internationella energimyndigheten (IEA) betonar att ammoniakbehovet globalt kommer att öka på grund av en växande befolkning och ökat välstånd. Grön ammoniak, producerad från förnybara källor, kan bli konkurrenskraftig mot fossilbaserad ammoniak och bidra till att minska koldioxidutsläppen och det globala beroendet av fossila bränslen.

Sammanfattningsvis visar framstegen inom väte- och ammoniakproduktion att dessa teknologier har stor potential för en mer hållbar och säker energiomställning, men det återstår ekonomiska och tekniska utmaningar innan de kan genomföras i stor skala. De teknologiska innovationerna inom produktion, lagring och effektivitet för både väte och ammoniak erbjuder lovande lösningar för att möta framtidens energibehov och uppfylla det globala klimatmålet.

Källor

1. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw7-SvBhB6EiwAwYdCAdY89ts1HsdxbwgaJl0UkkCQzNBQ2fqrqpmwFCRVPBfGrcf2xvqENxoCda0QAvD_BwE
2. <https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/green-deal/>
3. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
4. <https://climate.copernicus.eu/global-temperature-exceeds-2degc-above-pre-industrial-average-17-november>
5. "Press corner". European Commission - European Commission. Retrieved 2021-01-10.
6. "UNEP: Emissions Gap Report 2020" (PDF).
7. Heil, Mark T.; Wodon, Quentin T. (1997). "Inequality in CO₂ Emissions Between Poor and Rich Countries". *The Journal of Environment & Development*. 6 (4): 426–452. doi:10.1177/107049659700600404. ISSN 1070-4965. JSTOR 44319289. S2CID 153901525.
8. <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.arcada.fi/2443/science/article/pii/S0306261923018482>
9. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-offshore-wind>
10. [A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS-libre.pdf \(d1 wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](https://www.mdpi.com/2076-3417/13/15/8711)
11. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/15/8711>
12. <https://www.statista.com/statistics/760001/global-hydrogen-demand-by-sector-sustainable-scenario/>
13. <https://www.statista.com/statistics/1345802/forecast-value-global-ammonia-emand/>
14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921036697>
15. <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/1/67>
16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922060505>
17. <https://www.mdpi.com/1099-4300/22/11/1286>
18. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123000911>
19. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1171>
20. <https://www.mdpi.com/2504-477X/7/3/119>
21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919309656>
22. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1973>
23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120306649>
24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818342446>
25. <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/3/94>
26. <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.26355>
27. <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/Lecture-4-slides.pdf>
28. <http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4550-6555c/spring10/lecture-safety-disasters.pdf>
29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917308418>
30. <https://meridian.allenpress.com/corrosion/article-abstract/72/7/943/163700/Hydrogen-Embrittlement-of-Industrial-Components>
31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X21006612>
32. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509320309229>
33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509320315495>
34. <https://plasmakinetics.com/>
35. file:///C:/Users/Rasmus%20Koponen/Downloads/White_paper_POWERPASTE_final.pdf
36. <https://www.ammoniaknowhow.com/wp-content/uploads/2017/02/2014-Venkat-The-safety-and-integrity-of-ammonia-storage-tanks.pdf>
37. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622035326>
38. <https://www.prnewswire.com/>
39. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1623>
40. [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(23\)01466-9](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(23)01466-9)
41. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420314498>
43. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916334036>
44. <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/5/1390>
45. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainability/articles/10.3389/frsus.2022.943145/full>
46. <https://www.osti.gov/biblio/1239543>
47. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap/executive-summary>
48. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
49. https://iea.blob.core.windows.net/assets/23c82928-ab51-4725-836b-8efc8ea540d2/Ammonia_Launchpresentation.pdf
50. [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(20\)30173-2](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(20)30173-2)
51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919318227>
52. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.8b02447>
53. <https://pubs.naruc.org/pub/F74D4EC2-155D-0A36-310F-F5B22DC3E286>
54. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123001874>
55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222031590>
56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623612032634X>
57. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1872206717629498>

58. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aat6967>
59. <https://www.greenunivers.com/2022/03/hydrogene-hysata-annonce-un-rendement-delectrolyse-de-98-284107/>
60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277242712200078X>
61. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-32652-y>
62. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsanm.1c04331>
63. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202203164>
64. <https://www.sustainabilityenvironment.com/2022/11/14/home-solar-panel-that-produces-hydrogen/?amp=1>
65. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202000029>
66. <https://www.eni.com/ennext/en-US/portfolio/sustainable-mobility/c-zero.html>
67. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.1c01679>
68. <https://www.pnnl.gov/>
69. <https://www.wired.com/story/gold-hydrogen/>
70. <https://www.businesswire.com/news/home/20220927005409/en/Cemvita%E2%80%99s-Successful-Field-Test-Demonstrates-Gold-Hydrogen%E2%84%A2-Production-in-Situ>
71. <https://www.prnewswire.com/>
72. <https://www.nrel.gov/news/program/2023/hydrogen-blending-as-a-pathway-toward-u.s.-decarbonization.html>
73. <https://climateanalytics.org/publications/eu-2030-emissions-reduction-target-needs-to-be-brought-into-line-with-the-paris-agreement-15c-limit>