

Teknologisk Udsyn · Power-to-X

Danmarks internationale styrker inden for Power-to-X

Teknologisk Institut er et uafhængigt og almennyttigt forsknings- og udviklingsinstitut, der er godkendt som GTS-institut af Uddannelses- og Forskningsministeren. Instituttet har siden 1906 arbejdet for at fremme udnyttelsen af teknologiske fremskridt til gavn for erhvervsliv og samfund gennem udvikling, rådgivning og formidling. Vi opfylder dette formål ved at udvikle ny viden gennem forsknings- og udviklingsaktiviteter, som omsættes til teknologiske serviceydelser og stilles til rådighed på markedsvilkår.

Udarbejdet af
Teknologisk Institut
Geggersensvej 1
2630 Taastrup

Teknologisk Udsyn · Power-to-X
Danmarks internationale styrker
inden for Power-to-X
v.2025-08-25.01

Forfattere:
Leif H. Jakobsen og Thomas Kjeldager Ryan

Fotos brugt med tilladelse fra:
GreenLab (forside, bagside, s. 17), Stiesdal A/S (s. 26, 48), Dynelectro ApS (s. 32)

August 2025

ISBN 978-87-91461-91-0

Indhold

Tre hovedpointer	5
Forord	7
Executive Summary	8
Indledning	12
Sådan har vi gjort	13
Fokus og afgrænsning	14
PtX-teknologier og produktionsmetoder . . .	18
Danske styrker set i en international kontekst.	20
Forskning	20
Teknologi - teknologiudvikling gennem patenter	28
Marked	38
Perspektivering - vurdering af de danske styrker inden for PtX	49
Bibliografi	55
Teknologisk Institut rådgiver om Power-to-X	58



Se fremad, fremad! Aflur den kommende tid de veje, den vil bane for udviklingen, og stil jer så dér, hvor I aner, at Instituttets hjælp bliver fornøden. Vent ikke, at nyt land nås ad gamle, banede veje. Ad ukendte stier og snarveje vil vejen ofte gå.

Gunnar Gregersen,
Grundlægger af Teknologisk Institut

Tre hovedpointer

Danmark har en unik position inden for Power-to-X med omfattende teknologisk ekspertise på områder som elektrolyse og et stærkt industrielt udviklingsmiljø med fokus på både forskning og innovation. Men konkurrencen fra store lande som USA, Tyskland og Kina er intens, så en koordineret indsats er afgørende for at fastholde og styrke Danmarks førerposition.

Et stærkt dansk Power-to-X-marked skal etableres

Hvis vi skal accelerere udviklingen af grøn brint og andre grønne Power-to-X-produkter, bør Danmark udvikle et stærkt hjemmemarked. Det vil danne grundlag for fortsat at udvikle vores teknologiske kompetencer og for at skabe nye og mere effektive måder til at fremstille Power-to-X-produkter, der kan bidrage til den grønne omstilling af industri, landbrug og skibsfart samt pålidelig energiforsyning.

Frem internationaliseringen af den danske Power-to-X-ekspertise

Dansk Power-to-X-teknologi har potentiale til at blive en global succes. Vi skal udnytte vores allerede stærke position og ekspertise på udenlandske markeder til yderligere at fremme eksport af den teknologi og service, vi accelerer udviklingen af i Danmark.

Styrk strategisk innovation og industrialisering af Power-to-X-teknologier

Power-to-X-teknologierne bygger langt hen ad vejen på kendt teknologi, men der er fortsat behov for mere effektive løsninger og for at skalere teknologien. Potentialet skal realiseres gennem målrettede investeringer i forskning og udvikling, der prioriterer opskalering og industrialisering af de allerede kendte teknologier. Samtidig skal der satses på udvikling af teknologisk infrastruktur, der understøtter test og modning af industriparate løsninger.

Teknologisk Udsyn skaber klarhed i et komplekst landskab ud fra fakta om teknologi, marked, tendenser og kortlægning af aktører. Vi viser mulighederne for at styrke de danske virksomheders konkurrenceevne gennem innovation, samarbejde og investering i teknologi. Vi har som mål at vise vejen til en banebrydende, bæredygtig og økonomisk levedygtig fremtid.

Lad os bygge en bedre fremtid sammen!

Juan Farré,
Adm. direktør, Teknologisk Institut



Power-to-X omfatter processer, der ved hjælp af elektricitet og videre forarbejdning fremstiller CO₂-neutrale brændstoffer og produkter som brint.

Forord

Power-to-X omfatter processer, der ved hjælp af elektricitet og videre forarbejdning fremstiller CO₂-neutrale brændstoffer og produkter. Disse brændstoffer kan anvendes i tung vejtransport, søfart og luftfart samt til fremstilling af CO₂-neutrale produkter som fx gødning og grønne plastprodukter. Power-to-X er tiltænkt en vital rolle i den grønne omstilling. Denne omstillingsproces står imidlertid over for en række udfordringer både af teknologisk og samfundsmæssig art. Der er derfor behov for at adressere udfordringerne for at understøtte omstillingsprocessen, så Danmark kan indfri målsætningerne om at nedbringe CO₂-udledningerne.

Mange virksomheder har kastet sig over Power-to-X. Der er igangsat FoU-projekter og planlagt flere produktionsanlæg, hvoraf nogle er ved at komme i drift. Men vi står i en situation, hvor sektoren kan tabe momentum til skade for udviklingen af en teknologiorienteret vækstsektor på et område, hvor Danmark besidder betydelige styrker.

Teknologisk Institut har i mange år arbejdet for, og vil fortsat arbejde med, omstilling af energisektoren og ikke mindst med Power-to-X. I samarbejdet med sektoren har vi

fremmet udviklingen af nye teknologier og teknologiske løsninger, så Power-to-X kan implementeres både økonomisk og klimamæssigt forsvarligt.

Denne publikation er et bidrag til at oplyse og understøtte debatten om, hvordan Danmark fortsat kan udvikle en industriel styrke inden for Power-to-X, og ikke mindst, hvordan der kan skabes et teknologisk udviklingsmiljø, som kan adressere de teknologiske udfordringer og fremme fortsat teknologiudvikling.

Publikationen er baseret på omfattende vidensindsamling og perspektiver fra centrale og indsigtsfulde aktører i og omkring Power-to-X.

God læselyst



David Tveit
Direktør
Energi og klima
Teknologisk Institut



Mikkel Agerbæk
Direktør
Materialer
Teknologisk Institut

Executive Summary

Danmarks internationale styrker inden for Power-to-X

Teknologisk Udsyn for Power-to-X (PtX) kortlægger Danmarks teknologiske styrkepositioner inden for PtX. Med fokus på forskning, innovation og udviklingen af en egentlig PtX-industri undersøger vi samtidig, hvordan en dansk erhvervssucces inden for PtX er internationalt udfordret.

Vejen frem: Samtænke teknologi- og markedsudvikling

Danmark har stærke teknologiske kompetencer inden for PtX med et potentiale til fremover at være blandt de førende lande inden for udvikling og som leverandør af PtX-teknologi. Det kræver dog en strategisk indsats for at imødegå udfordringerne i en international konkurrencepræget industri.

Vi opfordrer til at fremme teknologiudviklingen gennem målrettet innovation og praktisk erfaringsopsamling fra markedet. Konkret anbefaler vi følgende næste skridt:

1. Udvikling af et marked for PtX-produkter

Danmark bør udvikle et dansk marked for PtX-produkter med inspiration fra Regional Clean Hydrogen Hubs Program (USA), men også med erfaringer fra Norge og Tyskland. Gennem dette marked kan Danmark opbygge teknologisk viden og erfaring til gavn for

danske teknologileverandører. Konkret kan dette fx gøres ved at fremme:

- et klimamæssigt neutralt dansk landbrug ved at producere grøn ammoniak (gødning) og metanol som brændstof til tunge maskiner.
- fossilfri skibsfart gennem et produktions- og distributionsnet for brændsler til skibsfart. Det kunne ske ved at søge samarbejde med Norge – eller med andre lande i Nord-europa – for etablering af et nordisk "ammonia fuel bunkering network".

2. Styrke strategisk innovation og industrialisering

PtX-teknologien er grundlæggende kendt, men ikke fuldt industrialiseret. Udvikling af nye markeder for PtX-produkter vil derfor kræve innovationsinitiativer målrettet industrialisering. Det vil betyde innovation i hele værdikæden omfattende generel teknologi-udvikling samt udvikling af relevant produktions- og infrastrukturteknologi, herunder testfaciliteter.

3. Fremme internationaliseringen af dansk PtX-industri

Danske PtX-virksomheder er allerede til stede på en række udenlandske markeder, især i Europa og USA, som leverandører af teknologi og service. Parallelt med udviklingen af et dansk marked bør danskbasert teknologi-udvikling og innovation inden for PtX udnyt-



tes til yderligere at fremme eksporten af dansk teknologi og viden om implementering af PtX.

Danske styrker

En egentlig dansk PtX-industri er under udvikling, og målt på antal virksomheder og beskæftigelse er den relativt stor i forhold til Tyskland og USA. Det danske forsknings- og innovationsmiljø er internationalt anerkendt, bl.a. på grund af en stærk samarbejdskultur mellem industri og forskningsinstitutioner, som er afgørende for at accelerere innovation og teknologisk udvikling af PtX-løsninger af høj kvalitet. Det danske PtX-miljø besidder i en international sammenligning med Norge, Tyskland og USA en række særlige styrker:

- **Forskningsmæssig styrke:** Dansk PtX-forskning er relativt set blandt de mest publicerende lande i verden, og med den fjerdehøjeste citationsscore i verden yder forskningen et stort bidrag til den teknologiske udvikling.

- **Teknologisk styrke inden for elektrolyse:** Tre og af fire danske patenter inden for PtX omhandler elektrolyse – ikke bare inden for de mere modne teknologier, men også inden for nyere og mere effektive former for elektrolyse. Hertil kommer teknologisk viden og erfaringer fra en lang række igangsatte PtX-anlæg i Danmark, men også fra udlandet.

- **Et stærkt industrielt udviklingsmiljø:** Danmark har stærkt fokus på forskning og innovation, hvilket afspejles i dansk industris hyppige deltagelse i forskningssamarbejder med universiteter, GTS-institutter m.fl. Derudover er værdikædesamarbejde mellem forskning og industri udbredt og afgørende for udvikling og etablering af PtX-anlæg – særligt med hensyn til sektorkobling og integration af grøn strøm. Dansk PtX-industri er desuden førende inden for udvikling og implementering af PtX-anlæg, både nationalt og internationalt.

Udfordringer ude som hjemme

Danmark står også over for konkurrence fra andre lande med stærke industrielle og teknologiske kompetencer. Desuden har lande som Norge og Tyskland et stærkere fokus på at udvikle et marked for PtX-brændsler og -produkter, hvilket fremmer den teknologiske udvikling og i sidste ende etableringen af en fuldt udviklet værdikæde inden for både teknologiudvikling, produktion og afsætning af PtX-brændsler mv.

Udvikling og implementering af PtX i Danmark følger ikke helt trop med de ambitiøse mål om 4-6 GW elektrolyse kapacitet i 2030. Udbygningen af produktionsfaciliteter til grøn strøm er sat i bebo og etableringen af brintrør til Tyskland er efter at være udskudt relanceret i form af en kortere rørforbindelse fra Esbjerg. Vi ser stadig, at de forretningsmæssige muligheder udfordret, og flere PtX-projekter er forsinkede eller sat i bero. Det påvirker også danske teknologiudviklere og -leverandører.

PtX-udviklingen udfordres af usikre forretningsmodeller og tilbageholdenhed over for nye investeringer. Dette risikerer at svække den danske PtX-industri i den internationale konkurrence – både som leverandør af PtX-produkter og som udbyder af teknologiske løsninger.

Et vækstområde for fremtiden

Danmarks fremtid som en førende leverandør af PtX-teknologi afhænger af, om vi formår at udvikle vores styrker.

Med de "næste skridt" er det vores intention at åbne for en strategisk dialog om, hvad Danmark kan gøre at udvikle vores styrker til gavn både for den grønne omstilling og for udvikling af et teknologisk og erhvervsmæssigt vækstområde inden for PtX.



Power-to-X er tiltænkt en vital rolle i den grønne omstilling, hvor fx grønne brændsler kan bruges til tung transport og skibsfart.

Indledning

Power-to-X (PtX) forventes at blive en væsentlig bidragsyder til den grønne omstilling i Danmark (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2021). De grundlæggende teknologier bag PtX er kendte, herunder produktionsmetoderne til at fremstille grøn brint, grøn ammoniak, grøn metanol o. lign. De kendte PtX-teknologier står imidlertid over for et behov for videreudvikling i forhold til opskalering og opnåelse af øget energieffektivitet. Derudover fordrer det udvikling af lagringsfaciliteter og infrastruktur til distribution. Endelig skal teknologierne implementeres gennem investeringer i produktions- og distributionsanlæg for at udvikle markedet. Danmark står i en unik udgangsposition, og en værdikæde inden for PtX er under udvikling (Teknologisk Institut, 2022) (Teknologisk Institut, 2024), men landet kan dog hurtigt blive udfordret af teknologiske, markedsmæssige og politiske usikkerheder (Teknologisk Institut, 2023), ligesom andre lande eller markeder kan udvikle deres konkurrencemæssige fordele.

Udgangspunktet for Teknologisk Udsyn for PtX er teknologi- og markedsudviklingen og de politiske rammevilkår i en række lande, som Danmark både konkurrerer og samarbejder med.

Formålet med Teknologisk Udsyn er at sætte den danske PtX-industri i et større internationalt perspektiv, hvad angår teknologi- og markedsudvikling. Teknologisk Udsyn vil således belyse den internationale konkurrence-



situation gennem en række konkurrentlandes indsats inden for forskning og innovation og, ikke mindst, gennem udvikling af en egentlig PtX-industri.

Teknologisk Udsyn skal således bidrage til at identificere danske styrker og styrkepositioner for at undersøge, om og hvordan en dansk erhvervssucces inden for PtX udfordres af den internationale udvikling. Teknologisk Udsyn vil med afsæt i danske styrker desuden pege på muligheder for at udvikle en stærkere dansk PtX-industri, så den kan udvikle og levere PtX-teknologiske løsninger.

Sådan har vi gjort

Teknologisk Udsyn benytter sig af en kombination af kvantitative og kvalitative metoder til at analysere Danmarks internationale konkurrencesituation inden for PtX. Metodisk triangulering har været en central fremgangsmåde for at sikre validiteten af vores resultater. Ved at kombinere forskellige datakilder og analysemetoder har vi fået et mere nuanceret billede af den danske PtX-industris styrker og udfordringer på det internationale marked.

Bibliometrisk analyse: Vi har anvendt bibliometriske data fra openalex.org til at vurdere forskningsaktivitet og -gennemslagskraft inden for PtX-relaterede emner. Fokus har været på antallet af publikationer med Digital Object Identifier (DOI), citationer og internationalt samarbejde som indikatorer for forskningsmæssig styrke.

Patentanalyse: Patenter er analyseret for at identificere teknologisk innovation og specialisering inden for elektrolyse, syntese og infrastruktur/lagring af PtX-produkter. Vi har anvendt data fra Patsnap. I analysen indgår kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder, som udtryk for, at ejerne af patenterne har en interesse i at sikre sig rettighederne til disse teknologiske nybrud på flere markeder.

Markedsanalyse: Vi har undersøgt industrielle strukturer og dynamikker i Danmark samt i udvalgte lande, primært Norge, Tyskland og USA. Denne del af analysen er baseret på både desk research, kvantitative data, herunder surveys med virksomheder, og kvalitative input fra workshops (se tekstboksen) samt

Deltagere i workshop om PtX

Den danske PtX-industri

- Claus Christiansen, Copenhagen Infrastructure Partners
- Jørgen Krogsgaard Jensen, Green Hydrogen Systems
- Søren Højgaard Jensen, Dynelectro
- Jens Erik Helbo Andersen, Hydrogen Valley
- Henrik Stiesdal, Stiesdal A/S
- Søren Linderøth, CApeX, DTU

Teknologisk Institut, PtX-eksperter

- John Lindegård Kjær
- Christian Kallesøe

interviews med virksomheder og eksperter inden for PtX-sektoren.

Strategisk analyse: De danske PtX-styrker er rammesat og perspektiveret ud fra andre landes styrker samt de politiske og økonomiske rammevilkår, der påvirker udviklingen af PtX-industrien, dvs. nationale og internationale strategier, investeringstendenser og regulering for grøn energi og PtX-produkter.

Gennem denne metodiske tilgang har vi kortlagt danske styrker og udfordringer i forhold til den globale udvikling inden for PtX. Rapportens resultater giver tillige et bud på, hvordan Danmark kan fastholde og styrke sin position på det internationale PtX-marked som teknologiudvikler og -leverandør.

Fokus og afgrænsning

Teknologisk Udsyn har fokus på styrker i forhold til udvikling af teknologier, der danner grundlag for fremstillingen af PtX-produkter eller -brændsler - og i mindre grad på de teknologier, der er nødvendige for at anvende PtX-produkter eller -brændsler. Teknologisk Udsyn tager derfor afsæt i følgende:

- Hvad forstås der ved styrker (styrkepositioner) i forhold til udvikling af PtX-teknologier?
- Hvordan afgrænses PtX-værdikæden til de aktører, som spiller en særlig rolle i udviklingen af PtX-teknologier?
- Udvalgte konkurrentlande, der også repræsenterer markeds- og samarbejdsmuligheder.

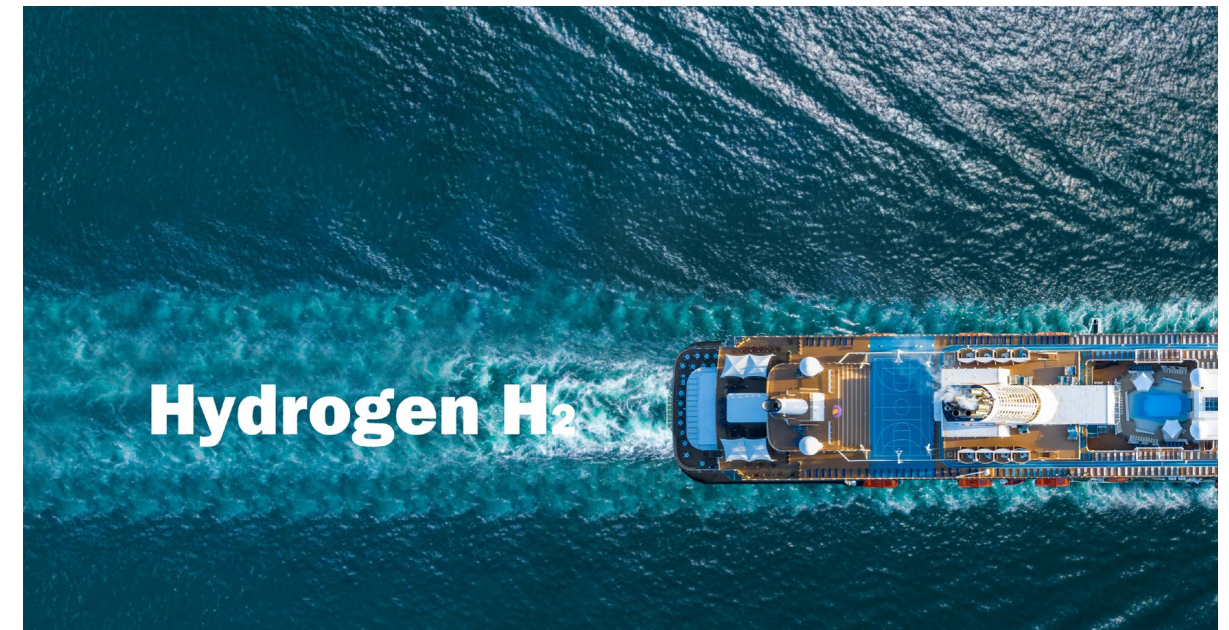
Nedenfor uddybes de tre ovenstående temaer, som dermed tjener til fokusering og afgrænsning af Teknologisk Udsyn.

Styrker og styrkepositioner

Identifikation af styrker eller styrkepositioner er ofte udgangspunktet for en politisk debat om erhvervs- og teknologiudvikling og, ikke mindst, om udviklingen af politiske initiativer til at fremme erhvervs- og teknologiudvikling. Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV) fører en løbende debat om teknologiudvikling og ikke mindst om Danmarks og andre landes styrkepositioner inden for forskellige teknologiområder; se fx (Teknologisk Institut, 2023) og (Teknologisk Institut, 2020). Ligeledes har Erhvervsministeriet har fået udarbejdet sådanne analyser; se fx (COWI, 2023) eller (IRIS Group, 2019).

Styrker inden for PtX er først og fremmest afgrænset til anvendelse af teknologier til fremstilling af brint og videre forarbejdning af brint. Der er imidlertid forskellige veje, teknologiudviklingen kan gå, og som dermed kan være afsæt for danske PtX-styrker. Teknologiudvikling kan således være et resultat skabt gennem en FoU-orienterede udviklingsvej og en mere industriel eller markedsorienterede udviklingsvej (Teknologisk Institut, 2012):

- STI-udviklingsveje (Science-Technology-Innovation): Teknologiudviklingen udspringer her af forskning og udvikling (FoU), hvor gennemgribende innovationer gør teknologi anvendelig. Her er forskning og samarbejde med universiteter mv. væsentlige kilder til innovation. Sådanne udviklingsprocesser kan afdækkes gennem analyser af forskningslitteratur og patenter, da disse oftest udspringer af forskning med høj teknologisk nyhedsværdi.
- DUI-udviklingsveje (learning by Doing, Using and Interacting): Teknologiudviklingen udspringer her i højere grad af teknologiske og forretningsmæssige initiativer i industrielle sammenhænge. Dette kan fx. have rod i vækststrategier, udviklingsprojekter eller samarbejder, som også kan inkludere investeringer, finansiering samt ambitioner om internationalisering. Den teknologiske nyhedsværdi vil ofte være lavere, men teknologiorienterede sektorer kan bygge videre på mere grundlæggende FoU. Da teknologierne oftere kommer i anvendelse, vil den kommercielle og samfundsøkonomiske værdi typisk være større. En måde at belyse denne udviklingsvej på er gennem analyser af industrien



(erhvervsstrukturer, værdikæde, økosystemer) for at afdække samarbejds mønstre og undersøge, om samarbejdet er teknologiorienteret, og inden for hvilke teknologiområder det foregår.

Begge disse udviklingsveje er relevante for PtX-industrien. På den ene side er PtX en relativt moden teknologi, hvilket tilsiger, at DUI-udviklingsvejen spiller en central rolle. På den anden side er PtX-teknologi endnu ikke slået igennem som en afgørende teknologi i den grønne omstilling, hvilket kan kalde på yderligere forskning og udvikling, fx i forhold til opskalering og effektivisering. Med henblik på at afdække danske styrker vil analysen både inkludere virksomheder, universiteter og andre videninstitutioner, der beskæftiger sig med teknologiudvikling, og vurdere, om de er blandt de bedste på deres felt.

Vurderingen af de danske styrker inden for PtX vil tillige blive understøttet af en belysning af:

- Markeds- og rammevilkår for udvikling af PtX-teknologier og markeder for PtX-produkter.

- Økonomisk aktivitet som resultat af PtX-industrien, målt på med beskæftigelse, omsætning og eksport, som i sidste ende afspejler en international konkurrencekraft.

Udvikling og lancering af PtX-produkter forudsætter ikke blot udvikling af PtX-teknologier. PtX skal tillige integreres i udviklingen af vores energisystem i retning af et grønnere energisystem. Forudsætninger og muligheder for et grønt energisystem beror ikke alene på, "hvad markedet gør", men også på tilvejebringelse af samfundsmæssige forudsætninger for et grønt energisystem. Derfor vil dette også indgå i det teknologiske udsyn.

En erhvervsmæssig styrkeposition er ofte belyst gennem de økonomiske resultater, som erhvervslivet skaber inden for et teknologiområde. En måling af de økonomiske resultater er medtaget her, men primært for at belyse, om PtX, som et relativt umodent marked, er ved at udvikle sig kommercielt - snarere end for at vurdere, om PtX er en erhvervsøkonomisk styrkeposition sammenlignet med andre økosystemer.

Fokus på udvikling af teknologier til fremstilling af PtX

PtX er en proces, hvor elektricitet anvendes til at fremstille CO₂-neutrale brændstoffer, fx til tung vejtransport, søfart og luftfart samt til fremstilling af CO₂-neutrale produkter som gødning og grønne plastprodukter. Ved brug af grøn strøm (power), typisk fra solceller eller vindmøller, kan man konvertere vand til brint og ilt via elektrolyse. Brinten kan herefter anvendes direkte eller blive videreforarbejdet til ammoniak og metanol, som kan anvendes som brændstof eller i kemiske processer.

Teknologisk Udsyn har primært et teknologisk fokus på den internationale konkurrencesituation inden for PtX. Analysen er derfor afgrænset til den del af PtX-værdikæden, som står for udvikling af PtX-teknologier og produktions-

anlæg samt etablering og drift af PtX-anlæg, herunder distributionsanlæg (se figur 1).

Analysen vil således kun inkludere virksomheder (sektorer), der tydeligt adresserer PtX-markedet teknologisk mht. udvikling og brug af PtX-teknologier. Herudover findes der også andre teknologier, som anvendes inden for PtX. Disse er primært generiske teknologier eller produkter, der kan anvendes i mange sammenhænge uden specifikt at være udviklet til PtX eller have undergået betydelige tilpasninger. Sådanne teknologier og produkter vil ikke indgå i analyserne.

Geografisk fokus

Teknologisk Udsyn har i vurderingen af danske styrker et internationalt udsyn. Vurderingen af

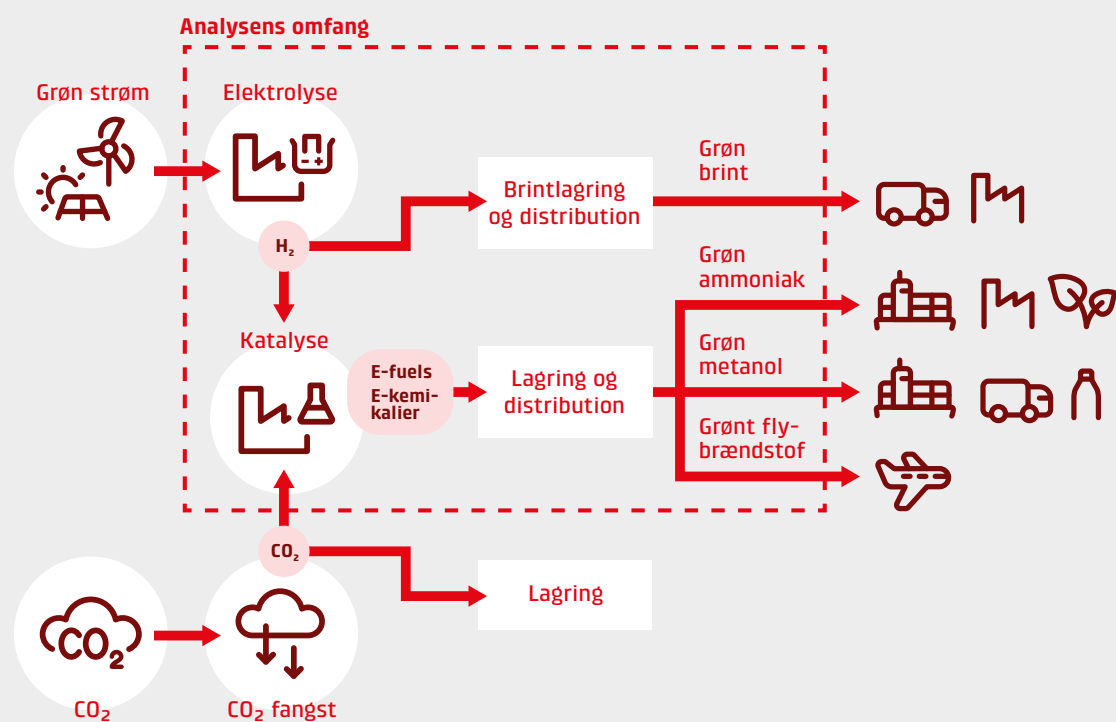
den danske PtX-industris internationale konkurrencesituation vil dog ske med afsæt i tre markeder (lande), som har særlig betydning for den danske industri, og som på hver sin måde repræsenterer forskellige typer af markeder:

- Norge har historisk haft og har fortsat en produktion af brint, som på sigt er ved at blive videreudviklet med nye PtX-teknologier. Norge udgør på en og samme tid både en konkurrent og en samarbejdspartner.
- Tyskland har stærke traditioner for storskala industriel produktion med et stort energibehov og derfor også et behov for grøn omstilling samt energimæssig forsyningssikkerhed. Tyskland har gennem årtier været et vigtigt eksportmarked for Danmark.
- USA har i stigende grad fokus på grøn energiproduktion og grøn omstilling generelt. Med afsæt i stærke industrielle traditioner, viden-

skabelig styrke, et stort marked, økonomisk og teknologisk risikovillighed, samt politiske initiativer, som direkte statsstøtte, er USA en konkurrent i forhold til udvikling, levering og brug af PtX-teknologi.

PtX-industrien i andre lande, såsom Japan, Frankrig, Holland, Kina m.fl., vil nu og i fremtiden givetvis også være væsentlige konkurrenter for den danske PtX-industri. Disse lande er ikke behandlet særskilt ud fra den antagelse, at den danske PtX-industri i overvejende grad orienterer sig mod de valgte udenlandske markeder. Men som de følgende analyser viser, er disse lande teknologisk godt med, og de vil derfor fremover i stigende grad kunne melde sig i konkurrencen.

Figur 1. Det samlede PtX-energisystem



Kilde: Teknologisk Institut.



PtX-teknologier og produktionsmetoder

Danske styrker inden for PtX omfatter teknologier og produktionsmetoder, der indgår i fremstilling af CO₂-neutral eller grøn brint samt andre grønne brændstoffer og kemikalier (se figur 1).

Grøn brint bliver produceret ved hjælp af elektrolyse; en proces der har været kendt i flere århundreder. Teknologiens modenhed betegnes som høj – Technology Readiness Level (TRL-niveau) – og er dermed tæt på markedet eller allerede i kommerciel anvendelse. Alkalisk elektrolyse er den mest modne og udbredte teknologi, men pga. af et stort energitab ved elektrolyse er der behov for at effektivere processerne. Andre elektrolyseprocesser, så som Proton Exchange Membrane (PEM) og Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC), er udviklet, men befinder sig på et lavere TRL-niveau og anvendes foreløbig i mindre grad industrielt (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2021) (Rambøll, 2021), (Wulf, 2020) og (Simon Araya, Cui, Li, Liso, & Sahlin, 2022).

For at opnå en CO₂-neutral brintproduktion (grøn brint) må energikilderne være CO₂-neutrale, hvilket kræver, at strømmen kommer fra fx vindkraftværker eller solcelleanlæg. Det er

også muligt at fremstille brint ved hjælp af fossile energikilder som kul (brun brint) eller naturgas (grå brint). CO₂-udledningen fra de fossile energikilder kan opsamles og lagres i undergrunden for at reducere udledningerne; denne brint omtales som blå brint.

Brint kan i sig selv være en energikilde. Det kan også konverteres – eller syntetiseres – til andre kulstofholdige brændstoffer som e-metan, metanol og ammoniak ved brug af biogent CO₂ – men det er også muligt ved brug af CO₂ indfanget fra afbrænding af fossile energikilder. Der findes forskellige synteseprocesser, afhængigt af hvilke produkter der skal fremstilles (Rambøll, 2021).

Fremstilling af PtX-produkter indgår i en værdikæde, hvor koblingen til andre sektorer eller led i værdikæden er kritiske for at få det samlede produktionssystem til at fungere. Vind og sol er fluktuerende energikilder, og de er ikke altid tilgængelige, så strømmen skal kunne lagres på den ene eller anden måde, evt. omdannes til brint for lagring og senere brug. Endelig skal man også kunne nå ud til aftagerne af PtX, hvilket gør adgang til infrastruktur for distribution og faciliteter til lagring yderst vigtigt.

🔗 **Produktion af Power-to-X-produkter skal kobles til andre sektorer og led i værdikæden for at det samlede produktions-system fungerer.**

Danske styrker set i en international kontekst

Ovenstående beskrivelse af PtX-teknologier og -produktionssystemer danner grundlag for at afdække danske styrker inden for PtX, som det kommer til udtryk gennem forskning og teknologiudvikling (patentering) inden for teknologiområder som elektrolyse, syntese samt infrastruktur og lagring.

Forskning

PtX dækker over en bred vifte af teknologier og bygger på mange forskellige forskningsfelter. Energiforskningen bidrager til at optimere effektiviteten og integrationen af vedvarende energikilder. Kemisk forskning fokuserer på elektrolyse- og synteseprocesser, som er afgørende for at omdanne energi til brugbare brændstoffer. Materialeforskningen er vigtig for at udvikle holdbare materialer, der kan forbedre elektrolyseanlæggenes effektivitet og levetid. Samtidig spiller avanceret datamodellering og procesoptimering en central rolle i at sikre, at systemerne kan skaleres op og drives omkostningseffektivt.

Forskning af relevans for PtX favner således et bredt emnefelt og flere fagområder, som i den bibliometriske analyse er afgrænset til emnerne elektrolyse, syntese, lagring og materialer.

Tilstedeværelsen af en industriel struktur og dynamik – de markeds-mæssige styrker – er til-lige afgørende for, om PtX kan yde et afgøren-de bidrag til den grønne omstilling. Det er også grundlaget for udviklingen af en ny værdikæde og dermed en erhvervsmæssig styrkeposition.

Analysen er baseret på bibliometriske data fra openalex.org, som tilbyder adgang til over 250 millioner forskningsartikler. Bibliometri-ske analyser er kvantitative undersøgelser af publikationer og publiceringsmønstre. Et land anses for at have en forskningsmæssig fører- position, når landets forskere producerer en betydelig mængde ofte citereret forskning, der er udviklet i samarbejde med internationale forskningsorganisationer og industrien. Tek-nologisk Udsyn fokuserer derfor på tre vigtige indikatorer for PtX-forskningen:

- Antal publikationer (absolut og per capita) som mål for forskningsaktiviteten.
- Citationer som mål for forskningens gennem-slagskraft.
- Andelen af publikationer, der er udarbejdet i samarbejde med internationale forsknings-partnere og/eller industrien, som mål for forskningsforankring.

Forskningen i tal

Udviklingen i antal forskningsartikler relate-ret til PtX har været støt stigende fra 2010 til 2023 med en markant vækst i de seneste år (se figur 2). Denne stigning indikerer en øget global forsknings- og samfundsmæssig interes-se for PtX-teknologier.

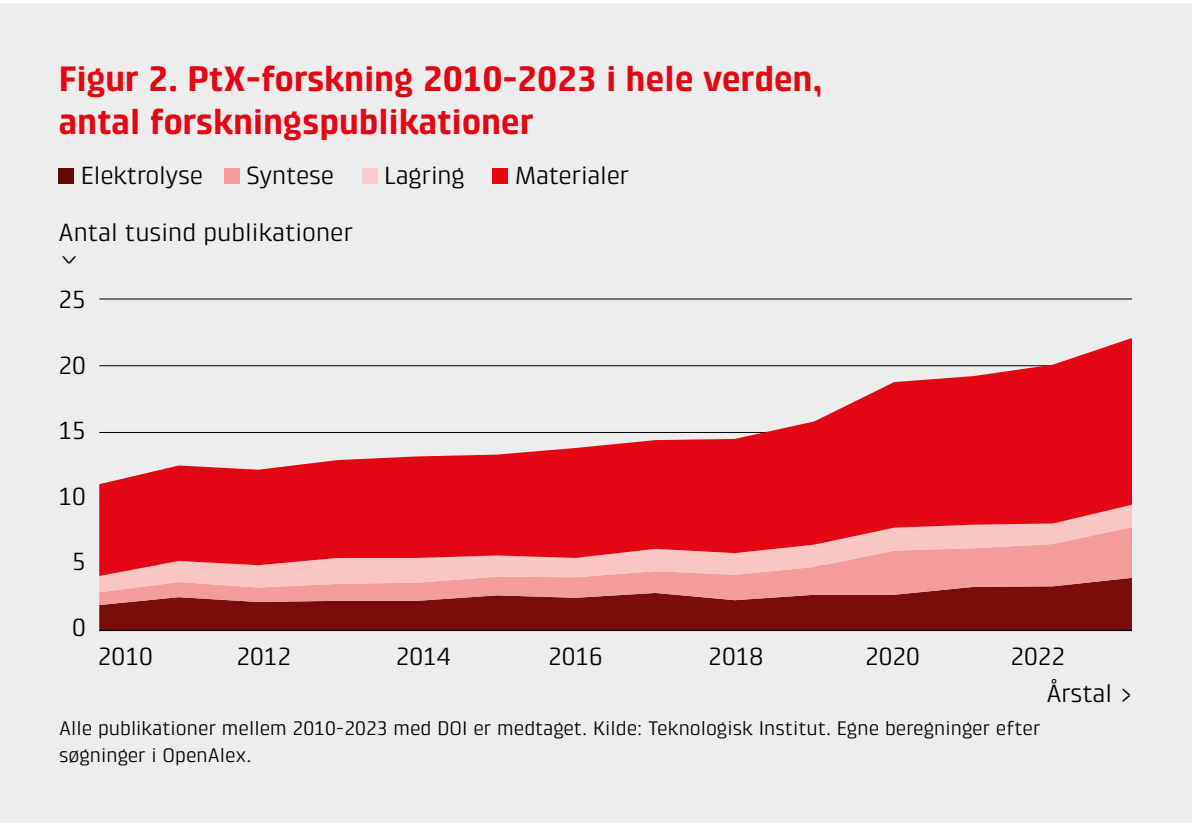
Opdelingen af forskningen i de fire områder – elektrolyse, syntese, lagring og materia-ler – viser, at materialeforskningen udgør den største andel. Dette understreger materialer-nes betydning for at forbedre effektiviteten og holdbarheden af PtX-teknologier. I øvrigt afspejler det, at meget fundamental materi-aleforskning er relevant for PtX. Syntese- og elektrolyseforskningen, begge centrale tekno-logier for PtX, er i dag nogenlunde lige store områder, hvilket indikerer stor interesse for både elektrolyse til dannelselse af brint ved brug af elektricitet og konvertering af brint til brugbare brændstoffer og lignende. Forsk-

ningen i relation til lagring af PtX har været konstant over tid, hvilket indikerer, at der er færre teknologiske udfordringer i forhold til udvikling af løsninger til effektiv lagring.

At der faktisk finder en del forskning sted inden for de fire forskelligartede forsknings-områder, indikerer, at værdikæden inden for PtX-produktion har behov for en tværfaglig tilgang – en synergi mellem elektrolyse, synte-se, lagring og materialer – for på afgørende vis at øge PtX-teknologiernes anvendelighed.

Den kraftige stigning fra omkring 2019 og frem kan skyldes både teknologiske gennem-brud og øget energipolitisk interesse, der fungerer som et incitament til øget forskning inden for dette felt.

Blandt de mest publicerende lande inden for PtX-forskning i perioden 2010-2023 er Kina dominerende med en forskningsproduktion på mere end 60.000 publikationer, hvilket langt





overstiger forskningsproduktionen i alle andre lande (se figur 3). Denne massive mængde forskning kan tilskrives strategiske satsninger inden for teknologisk forskning og industriel udvikling med ambitionen om at blive verdensledende, bl.a. gennem store investeringer i energiteknologi med det mål at blive førende inden for grøn omstilling (Kennedy, 2015) og (Jennifer Wong Leung, 2024).

USA spiller en vigtig rolle i udviklingen af nye energiteknologier, men det er også et tegn på en anderledes forskningsdynamik og prioritering sammenlignet med Kina.

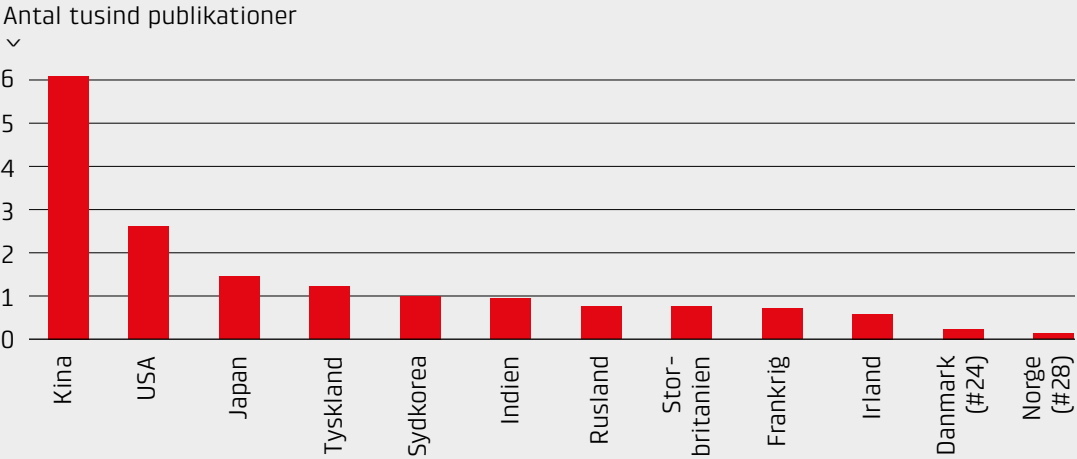
Japan og Tyskland følger efter med en betydelig, men mindre, forskningsproduktion, hvilket er baseret på stærke forskningsmiljøer inden for PtX og relaterede teknologier. Sydkorea og Indien viser også en betydelig indsats på dette område, hvilket fremhæver Asiens centrale position i udviklingen af nye energiteknologier.

En oversigt over de mest aktive forskningsorganisationer inden for PtX i perioden 2010-2023, målt på antal publikationer, viser, at

kinesiske institutioner dominerer som de mest forskningsaktive. Tianjin University toppe listen med over 8.000 publikationer, efterfulgt af Jilin University og Zhejiang University. Det er bemærkelsesværdigt, at Danmarks Tekniske Universitet (DTU) med godt 4.000 publikationer (hvoraf godt halvdelen er inden for elektrolyse) er den eneste ikke-asiatiske aktør blandt de mest aktive forskningsinstitutioner. Lidt længere nede på listen finder man institutioner som Kyushu University (Japan), Korea Institute of Science and Technology (Korea) og Forschungszentrum Jülich (Tyskland).

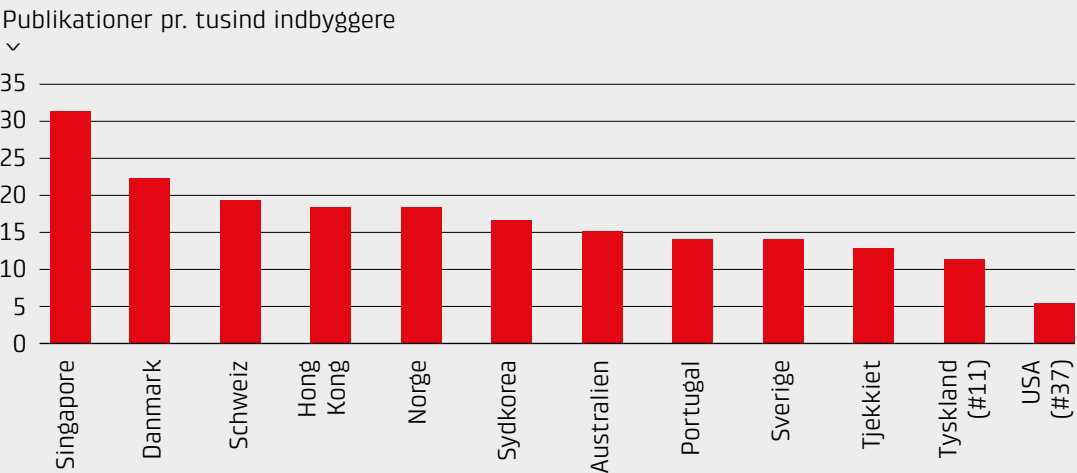
Måler man til gengæld forskningen pr. indbygger, får man et billede af det relative bidrag til den internationale forskning og dermed en noget anderledes rangering sammenlignet med den samlede forskningsvolumen (se figur 4). Her toppe Singapore som et tegn på en intensiv forskningsindsats i forhold til landets størrelse og befolkningstal. Danmark er også et af de mest publicerende lande pr. indbygger, hvilket indikerer en stærk national prioritering af PtX-teknologier og grøn omstilling. Sammenholdt med de mest publicerende lande, jf.

Figur 3. Mest publicerende lande inden for PtX-forskning 2010-2023



Alle publikationer mellem 2010-2023 med DOI er medtaget. Indeholder de ti mest producerende lande 2010-2023 samt Danmark og Norge. Kilde: Teknologisk Institut. Egne beregninger efter søgninger i OpenAlex.

Figur 4. De mest publicerende lande inden for PtX-forskning pr. tusind indbyggere i 2022



Alle publikationer mellem 2010-2023 med DOI er medtaget. Indeholder de ti mest producerende lande 2010-2023 samt Tyskland og USA. Kilde: Teknologisk Institut. Egne beregninger efter søgninger i OpenAlex.

figur 3, kan mindre lande også spille en relativt betydelig rolle i forskningen målt pr. indbygger. Dette peger på, at forskningsfokus og ressourcetildeling per capita kan være en vigtig indikator for identificering af ikke bare store, men også mindre landes rolle i udviklingen af nye teknologier og løsninger inden for PtX.

En opdeling af forskningen inden for PtX på de fire hovedområder: elektrolyse, syntese, lagring og materialer viser i perioden 2010-2023, at forskning i materialer fylder mest. Dette indikerer, at nye og forbedrede materialer er en kritisk komponent for elektrolyse og syntese med direkte indflydelse på effektiviteten

og holdbarheden af PtX-systemerne (se figur 5). Det skal dog tilføjes, at materialeforskning repræsenterer et forskningsfelt med en noget bredere anvendelse, hvilket imidlertid ikke fratager det dets betydning for PtX. Elektrolyse - elektrolyseprocesser til omdannelse af vand til brint - er det næststørste område med en stor publiceringsaktivitet inden for SOEC. Herefter kommer syntese – omdannelse af brint til brugbare brændstoffer og kemikalier – med en stor publiceringsaktivitet inden for ammoniaksyntese og elektrokatalyse samt katalytisk kuldioxidhydrogenering. Endelig er lagring det mindste af de fire forskningsområder.

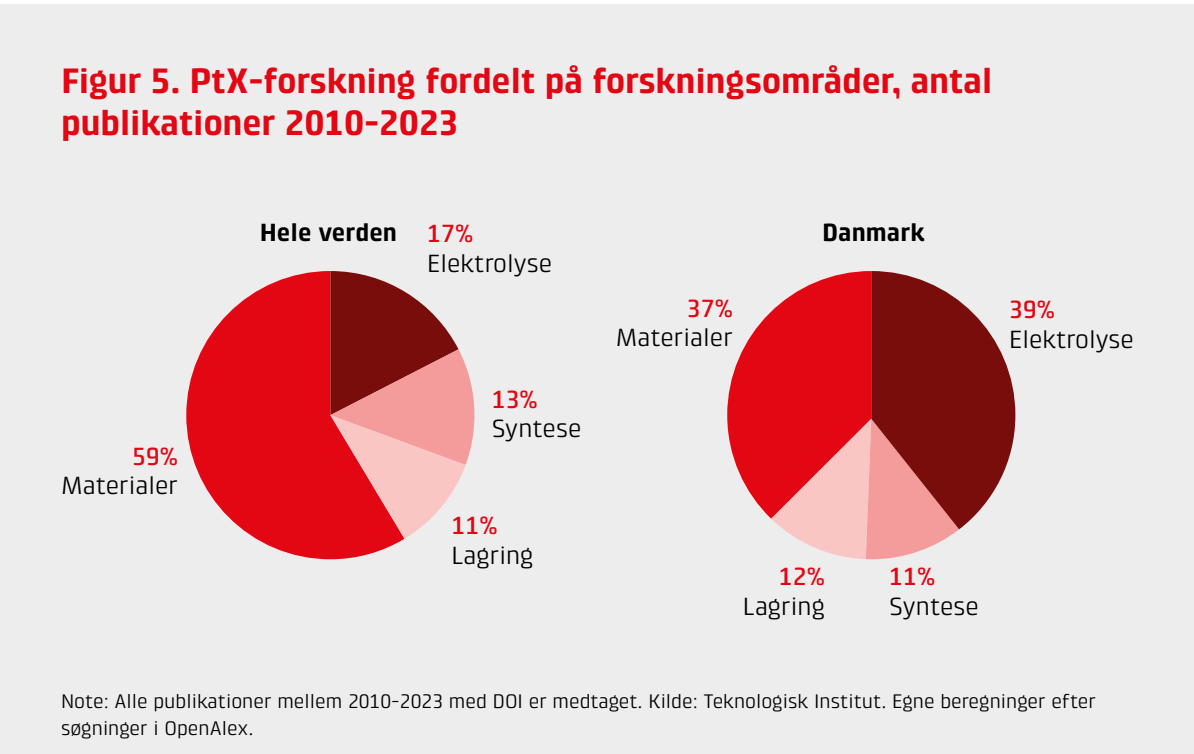
Når man sammenligner fordelingen af PtX-forskning i Danmark med resten af verden, ses der nogle interessante forskelle. I Danmark er der en tendens til en højere andel af forskning inden for elektrolyse, hvilket kan

tilskrives landets strategiske satsning på brint-teknologier og vedvarende energi. Samtidig er der en lidt lavere vægt på materialeforskning i forhold til det globale gennemsnit. Når det kommer til lagring og syntese, er fordelingen i Danmark relativt lig med den globale tendens, hvor begge områder udgør mindre, men vigtige dele af forskningsindsatsen. Dette tyder på, at Danmark følger de internationale trends, men med en særlig prioritering af elektrolyse som nøgleteknologi for den grønne omstilling.

PtX-forskningens gennemslagskraft

Når det drejer sig om gennemslagskraft i bred forstand, er antallet af citationer det bedste redskab til at belyse denne; jo flere citationer en artikel får, jo højere gennemslagskraft har

¹ En forskningsartikels gennemslagskraft kan umiddelbart tilskrives kvaliteten og betydningen af forskningen (Waltman, 2012). Flere andre faktorer påvirker dog også, hvor meget en publikation citeres, herunder hvor længe den har været udgivet og inden for hvilket forskningsfelt. Der er fx stor forskel på, hvor mange citationer en betydningsfuld artikel får inden for matematik, kemi eller biologi.



den. For at tage højde for forskelle mellem forskellige forskningsområder¹ er den bedste metode feltnormaliserede citationer, som beregnes ved at dividere antallet af citationer for en artikel med gennemsnittet for lignende artikler skrevet i samme år. Hvis en artikel har en feltnormaliseret citationsscore på 1, betyder det, at den er citeret lige så ofte som alle andre artikler, og ved værdien 2 dobbelt så ofte som gennemsnittet af sammenlignelige artikler publiceret i samme år. Metoden kan også anvendes til at vise et lands forskningsimpact inden for et forskningsfelt.

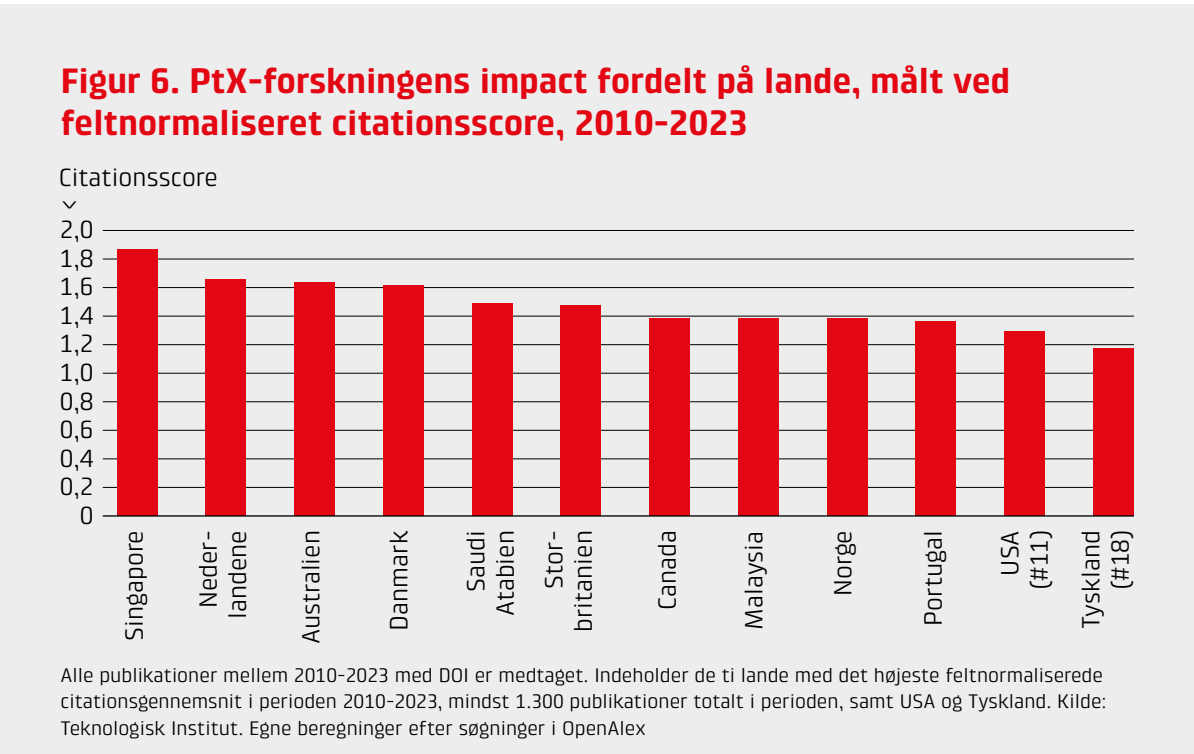
Ved at se på den samlede PtX-forskning fordelt på lande, ses det, at dansk PtX-forskning har stor betydning målt ved feltnormaliseret citationsimpact (se figur 6). Danmark ligger på en fjerdeplads efter Singapore, Nederlandene og Australien. Danmarks placering indikerer, at dansk

PtX-forskning ikke kun er produktiv, men også har en høj grad af anerkendelse og gennemslagskraft i det internationale forskningssamfund.

Efter Danmark følger en række andre vestlige lande,² herunder Norge, med en høj citationsrate over verdensgennemsnittet, hvilket indikerer en betydelig forskningsindsats med international relevans.

Derimod ligger USA og Tyskland i den lavere ende blandt de store nationer, men dog med citationsrater over gennemsnittet. Så selv lande med en stor volumen af publikationer kan opnå en relativt høj gennemsnitlig forskningskvalitet. Hertil kommer tilstedeværelsen af ikke-universitære forskningsinstitutioner, ofte med et mere praksisnært, industriorienteret forskningsfokus, og derfor en forskning, som ikke er lige så ofte citeret i akademisk litteratur.

² Saudi-Arabien ligger nummer fem i figur 6, men det er imidlertid almindelig kendt, at de overlagt forsøger at tilegne sig citationer ved at betale højt citerede udenlandske forskere for at skifte tilknytning til en saudiarabisk institution proforma, hvorfor indikatorerne ikke kan anvendes i dette lands tilfælde. Nature 2013. www.nature.com/articles/d41586-023-01523-x. www.sirisacademic.com/blog/a-turning-point-for-saudi-arabian-affiliations-in-the-2023-highly-cited-researchers-list-from-clarivate.



Tabel 1. Forskningsstyrke inden for elektrolyse, syntese, lagring og materialer fordelt på lande. Top-5-lande, målt på feltnormaliseret citationsimpact

	Elektrolyse	Syntese	Materialer	Lagring
1	Australien	Australien	Singapore	Australien
2	Sverige	Nederlandene	Hong Kong	Canada
3	Storbritannien	Storbritannien	Nederlandene	Storbritannien
4	Danmark	USA	Norge	Frankrig
5	Malaysia	Kina	Storbritannien	Tyrkiet

Alle publikationer mellem 2010-2023 med DOI er medtaget. Indeholder de fem lande med det højeste feltnormaliserede citationsgennemsnit i perioden 2010-2023 inden for fire underemner af PtX, mindst 100 publikationer totalt i perioden inden for emnet. Kilde: Teknologisk Institut. Egne beregninger efter søgninger i OpenAlex.

Sammenfattende viser figur 6, at de mest citerede lande ikke nødvendigvis er dem med den største forskningsvolumen, men derimod dem, hvor kvaliteten af forskningen er høj, og hvor forskningen er relevant og anerkendt internationalt.

En opdeling af PtX-forskningens impact inden for elektrolyse, syntese, lagring og materialer viser, at forskellige lande dominerer inden for forskellige fagområder, hvilket peger på regionale styrker og specialiseringer i det globale forskningslandskab (se tabel 1).

Inden for elektrolyse og syntese ser vi en stærk dominans af Australien og Storbritannien, mens Singapore og Australien fører inden

for henholdsvis materialer og lagring. Det er interessant, at nogle lande som Australien og Storbritannien går igen på tværs af flere kategorier; det indikerer en bredere forskningskapacitet inden for PtX-teknologier.

Danmarks position som nummer fire inden for elektrolyse er også bemærkelsesværdig, men flugter med en betydelig forskningsproduktion inden for netop dette (jf. figur 5).

Samlet set peger denne figur på geografiske forskelle i forskningsstyrke, hvilket kan hjælpe med at identificere potentielle internationale partnere og benchmarke Danmarks forskning på tværs af de fire nøgleområder.



Industriens rolle i den akademiske forskningslitteratur

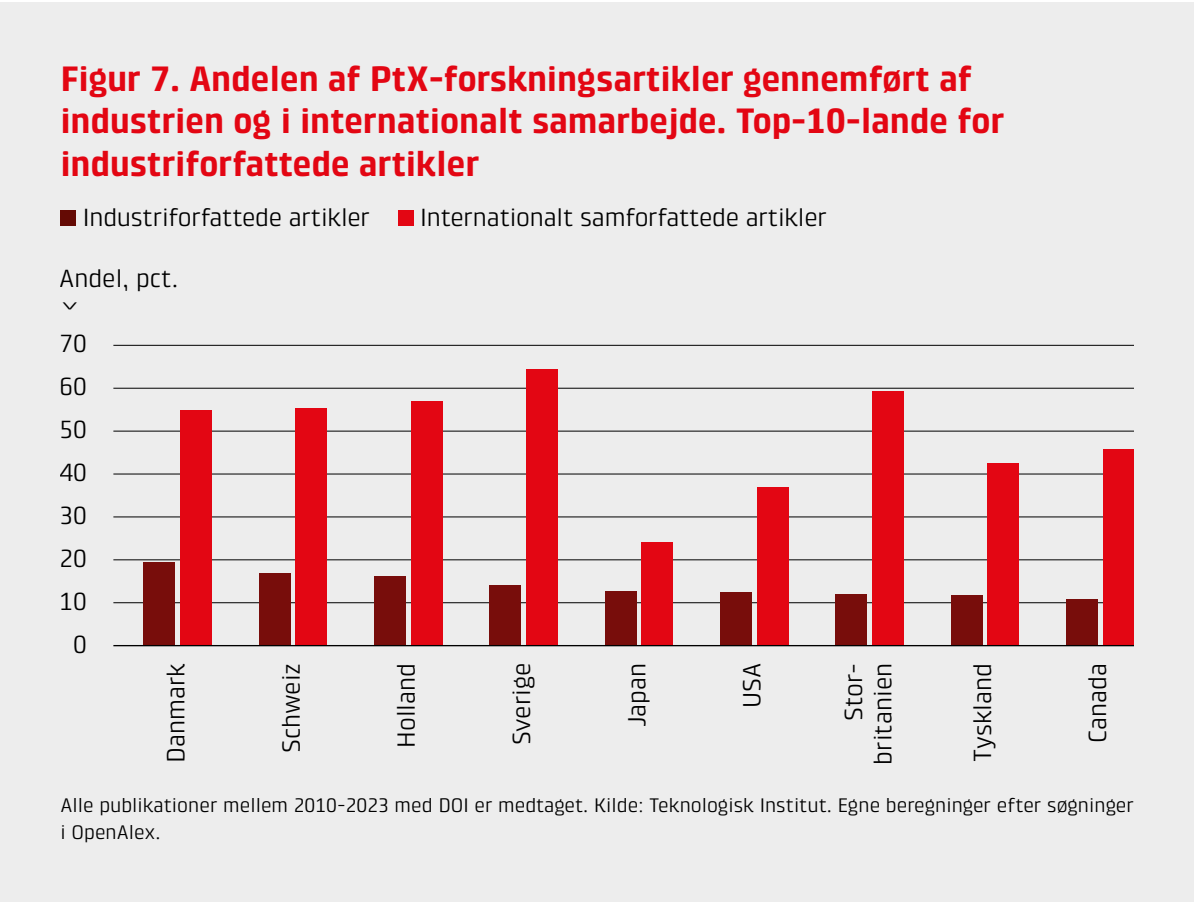
Når de mest citerede lande ikke nødvendigvis er de lande, der har den største forskningsvolumen, skal det ses i sammenhæng med kvaliteten af forskningen samt den anerkendelse og relevans, som forskningsmæssigt samarbejde afspejler.

Danmark udmærker sig med en høj andel af industriforfattede artikler, hvilket indikerer en stærk kobling mellem akademiske institutioner og industrien (se figur 7). Dette samarbejde er essentielt for at fremme innovation og praktisk anvendelse af nye teknologier. Schweiz, Holland og Sverige viser også betydelige niveauer af industrielt engagement, hvilket understøtter deres innovative kapacitet. USA og Tyskland ligger også i Top-10.



Blandt de mest forskningsaktive virksomheder internationalt finder man danske Topsoe, som er den eneste danske virksomhed på listen, med en markant position og 422 publikationer.

Hertil kommer, at de fleste lande også udmærker sig ved omfattende internationale samarbejder, hvilket kan indikere en stærk orientering mod global vidensudveksling.



Teknologi – teknologiudvikling gennem patenter

Patenter er et mål for teknologisk styrke. Patentet skal repræsentere en teknologisk ny landvinding. Med andre ord skal det kunne betegnes som en teknologisk nyhedsværdi, uden at det nødvendigvis er udtryk for en avanceret eller forskningsbaseret teknologisk landvinding.

For at indfange patenter af høj relevans for PtX er følgende kriterier lagt til grund for patentanalysen:

- Patentet skal være udtaget hos mindst fem patentmyndigheder (markeds-mæssigt tunge patenter). Patenterne er i denne undersøgelse henført til den myndighed eller det land, hvor patentet første gang er udtaget: Dette er typisk sammenfaldende med, at patent-tager også er hjemmehørende her. Når et patent er udstedt flere steder, er antagelsen, at patenttageren tillægger patentet så stor værdi, at de vil foretage denne investering og formentlig også forsvare deres patent trods de omkostninger, der måtte følge. Der er således større sandsynlighed for, at patentet

ikke "bare" repræsenterer en teknologisk nyhedsværdi, men også har værdi som en innovation, der kan kapitaliseres i markedet. De udtagne patenter vil alt andet lige repræsentere teknologisk innovation. Patentanalysen vil på den anden side medtage færre nye patenter, ligesom patenter udtaget af forskningsinstitutioner i mindre grad vil være repræsenteret. Forskningsmæssige styrker er dog belyst i det foregående afsnit.

- Patentanalyse er stramt afgrænset til tre teknologiområder inden for PtX:
 - Elektrolyse – fremstilling af brint
 - Syntese – fremstilling af e-metan, metanol og ammoniak samt produkter, der baserer sig herpå
 - Infrastruktur og lagring af brint og PtX-produkter

Patentanalysen omfatter således ikke produktion af grøn strøm, indfangning og lagring af CO₂, ligesom forbrugssiden – dvs. de processer, der relaterer sig brug eller afbrænding af PtX-produkter – ikke indgår.

Udvikling i antallet af udtagne patenter

Teknologierne bag PtX er som nævnt kendte og på et relativt højt teknologisk modenhedsniveau. Teknologiudviklingen – og dermed patentaktiviteten – har da også været beskeden frem til 2010. I 2010'erne øgedes opmærksomheden med en vækst i brugen af grønne energikilder og brændsler på bekostning af fossile energikilder, hvilket bl.a. er manifesteret i Paris-aftalen 2015 (COP21).



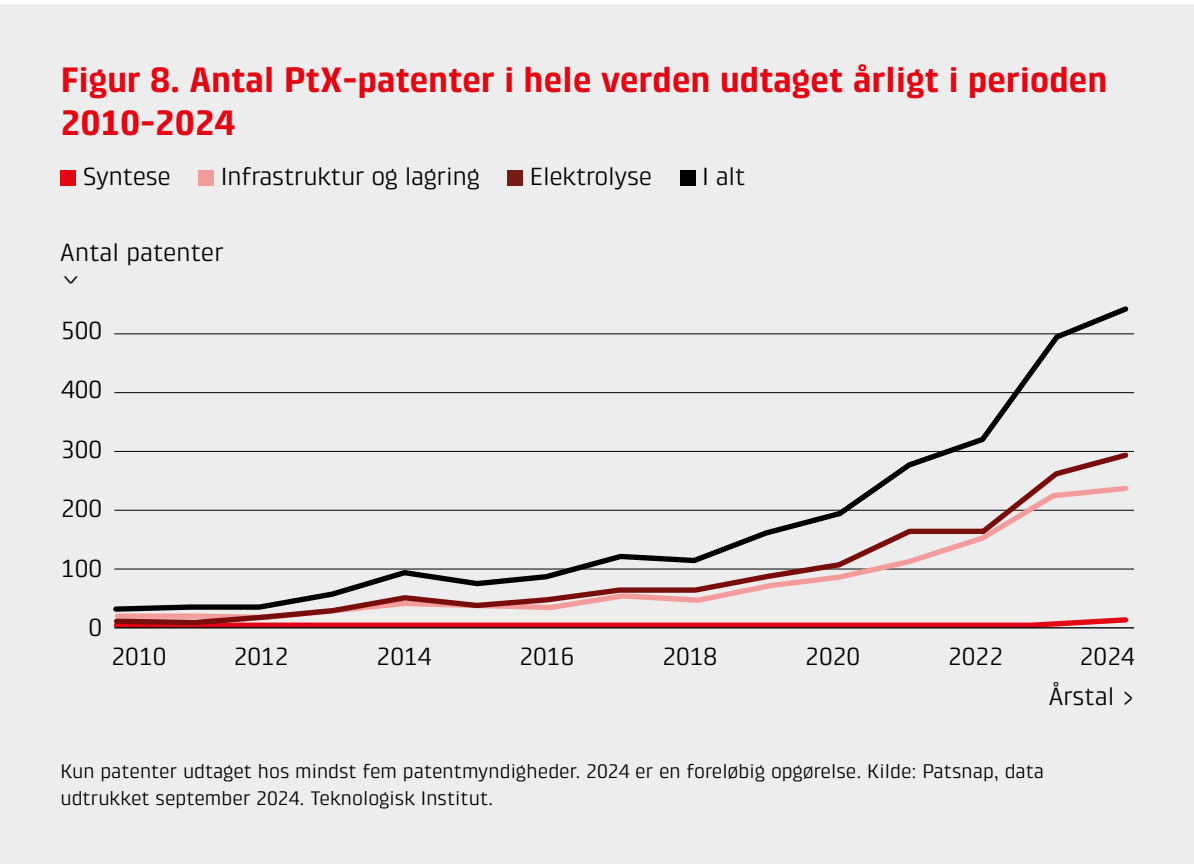
Fra midten af 2010'erne og frem har der været en betragtelig vækst i antallet af patenter udtaget ved mindst fem patentmyndigheder (se figur 8). Samlet set, og for elektrolyse samt infrastruktur og lagring, er den årlige patentaktivitet syvdoblet fra 2015 til 2024; og her skal det tages med i betragtning, at opgørelsen for 2024 er foreløbig. I alt er der udtaget 2.670 patenter i perioden. En revitalisering af teknologiudviklingen inden for PtX er således gået i gang for at finde løsninger på øget effektivisering og skalering af PtX-teknologierne.

De processer, som konverterer brint og CO₂ til e-metan, metanol og ammoniak, har ikke været genstand for en eksplosiv vækst i patenteringen. Danske PtX-eksperter forklarer dette med, at teknologierne inden for syntese håndteres som "property information" i de konkrete samarbejdsrelationer uden interesse for at udstille egen viden og knowhow gennem patenter (Teknologisk Institut, 2024).

Teknologisk specialisering i et geografisk perspektiv

Den geografiske fordeling af patenterne er en indikation på, hvor teknologiudviklingen finder sted. De fire lande – Danmark, Norge, Tyskland og USA, som er i fokus her – har siden 2010 udtaget en tredjedel af alle patenter inden for PtX. To andre lande har også en betydelig patentaktivitet inden for PtX. Det drejer sig om Japan og Frankrig, og sammen med de førnævnte fire lande tegner disse lande sig for to tredjedele af alle PtX-patenter i perioden 2010-2024.

Større lande vil alt andet lige have flere industrielle og forskningsmæssige udviklingsmiljøer, hvorfor den samlede patentaktivitet bliver større (se tabel 2). USA har derfor udtaget flest patenter. Vurderes patentaktiviteten som antal patenter pr. 1 mio. indbyggere, ligger USA meget lavt, mens Tyskland har 3,1 patenter pr. mio.



indbyggere, Norge 6,9 og Danmark 9,5. Relativt set har Danmark et stærkt udgangspunkt for at bidrage til udviklingen af PtX-teknologier.

Patenteringsaktiviteten opdelt på PtX-teknologiområder indikerer tillige en form for specialisering mellem landene (se figur 9). Generelt er der lidt større aktivitet inden for elektrolyse end inden for infrastruktur og lagring, hvilket også gælder for Tyskland og USA. Danmark og Norge har derimod et teknologisk fokus inden

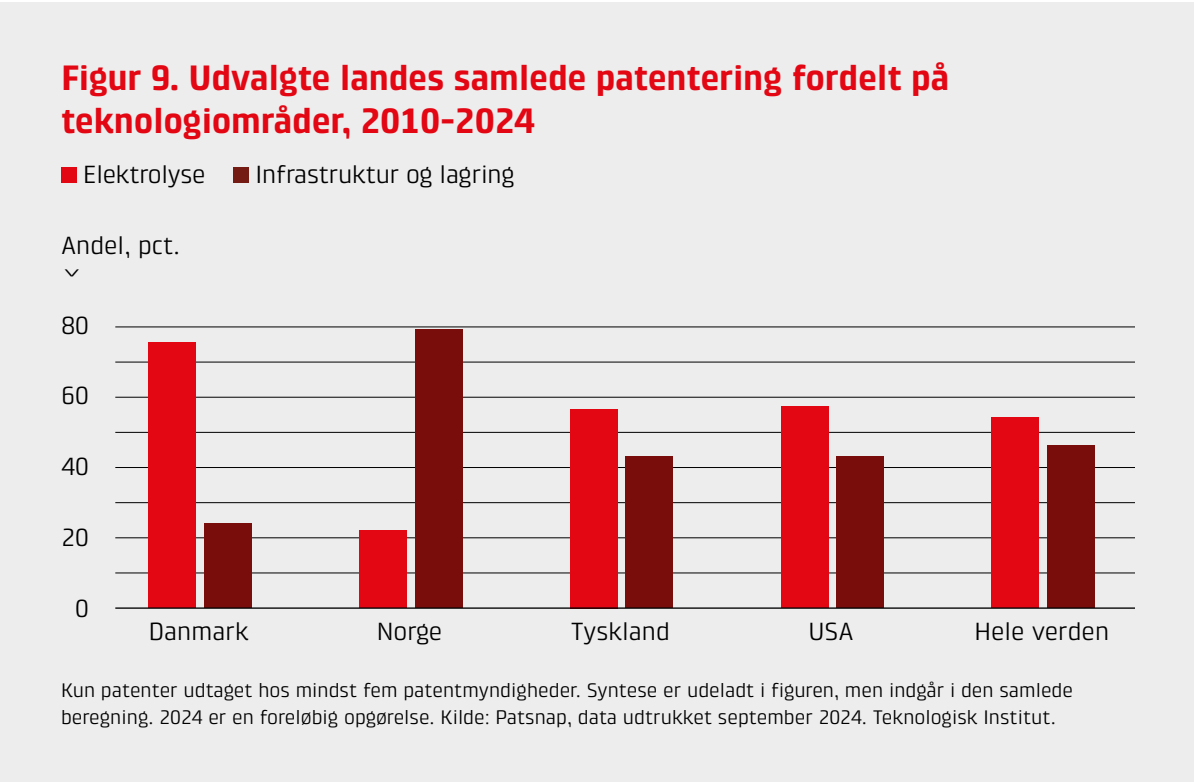
for henholdsvis elektrolyse (Danmark) og infrastruktur og lagring (Norge).

Umiddelbart kunne det antages, at større lande vil have en mere ligelig fordeling mellem de to PtX-teknologiområder. For Japan, som det mest patenterende land, gælder dette, men for Frankrig, med flere patenter end Tyskland, ligger 75 % af patenterne inden for infrastruktur og lagring, ligesom det er tilfældet for Norge.

Tabel 2. Samlet antal patenter udtaget i perioden 2010-2024

	Elektrolyse	Infrastruktur og lagring	Syntese	I alt
Danmark	41	13	1	55
Norge	8	29	0	37
Tyskland	144	110	3	257
USA	305	231	4	540

Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrukket september 2024. Teknologisk Institut.



Patenterende teknologier

Inden for elektrolyse er der en portefølje, som gør det relevant at se på de forskellige elektrolyseteknologier. De forskellige teknologier er på forskellige udviklingstrin. Alkalisk elektrolyse og PEM er de mest modne teknologier, og de er kommercielt tilgængelige. Her er udviklingsindsatsen rettet mod at reducere omkostningerne til brintproduktion. SOEC opnår for tiden den højeste effektivitet, men står over for udfordringer med holdbarheden. Anion Exchange Membrane (AEM) elektrolyse er stadig på et tidligere udviklingstrin, men nogle projekter er i drift bl.a. i Tyskland (International Energy Agency, 2024).

Inden for elektrolyse har der i de senere år været fortsat vækst inden for alkalisk elektrolyse, men væksten er på et lavere niveau end for PEM eller SOEC, hvilket afspejler teknologiens større modenhed. AEM-elektrolyse har vist stabil vækst (International Energy Agency, 2024).

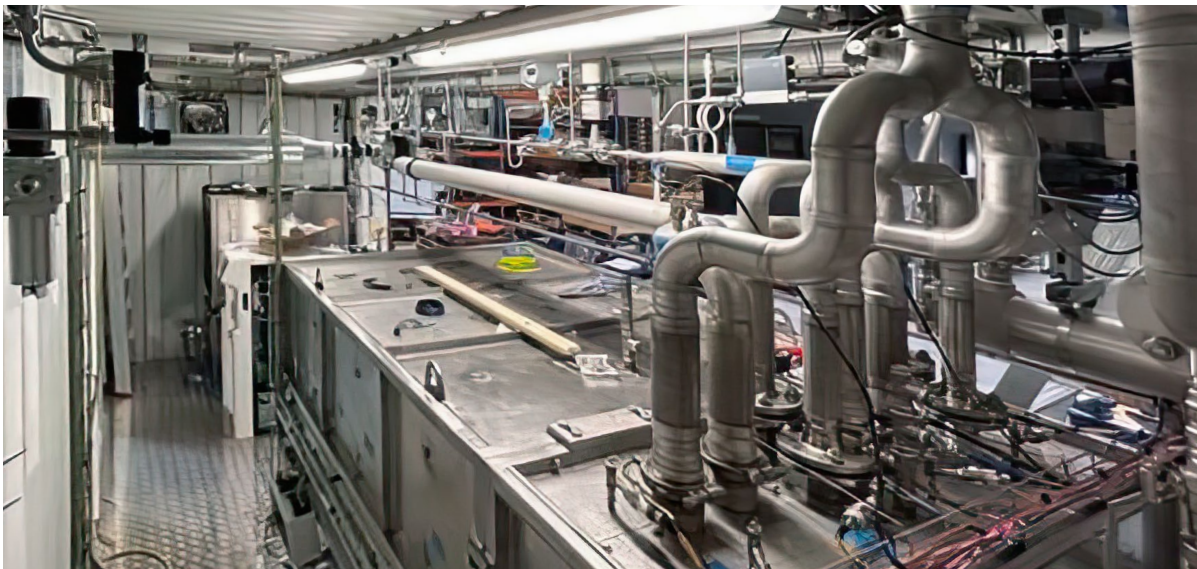


En gennemgang af de udtagne patenter inden for elektrolyse indikerer forskellige teknologiske styrker (specialiseringer) mellem de fire udvalgte lande. Mange patenter nævner ikke en specifik elektrolysemetode, hvorfor det ikke er muligt at kategorisere dem i forhold til en bestemt elektrolysemetode (se tabel 3). I forhold til Tyskland og USA har Danmark udtaget væsentligt færre patenter inden for alkalisk elektrolyse. Derimod står Danmark stærkere inden for PEM og SOEC med en andel af alle verdens patenter på henholdsvis 5 % og 26 %. Inden for

Tabel 3. Udtagne patenter inden for elektrolyse fordelt på elektrolysemetode, 2010-2024

	Danmark	Tyskland	USA	Alle patenter
Alkaline Electrolysis (AEL)	10%	25%	25%	11%
Proton Exchange Membrane (PEM)	17%	0%	12%	10%
Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC)	17%	0%	2%	2%
Anion Exchange Membrane (AEM)	0%	0%	3%	2%
High-Temperature Steam Electrolysis (HTSE)	2%	0%	4%	1%
Microbial Electrolysis Cell (MEC)	0%	0%	0%	1%
Photoelectrochemical (PEC) Electrolysis	0%	0%	4%	5%
Patentet er ikke knyttet til en specifik elektrolysemetode	54%	75%	58%	67%

Kategoriseringen af patenterne er foretaget ud fra hvilke elektrolysemetode som er nævnt i patenternes "abstracts". I mere end halvdelen af patenterne har en teknologisk kategorisering ikke været mulig, da elektrolysemetoden ikke er specificeret. En del af forklaringen er, at patenterne kan vedrøre komponenter eller delprocesser til elektrolyse. Norge udeladt pga. få og manglende data. Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrukket september 2024. Teknologisk Institut



SOEC peger dette på, at Danmark gennem bl.a. Dynelectro³ og Topsoe⁴ her har en egentlig styrkeposition inden for SOEC-teknologiudvikling, men det er fortsat et lille teknologiområde med blot 27 udtagne patenter på verdensplan.

Det er tillige muligt at belyse, hvilke teknologier, som bliver anvendt i de hydrogenprojekter (anlægsprojekter), som er drift i dag (se tabel

³ www.dynelectro.dk
⁴ www.topsoe.com/da/herning

Tabel 4. Anvendt teknologi for hydrogenprojekter i drift (anlægsprojekter) i 2024

	Danmark	Norge	Tyskland	USA	Alle lande
ALK	77%	63%	33%	0%	31%
PEM	8%	38%	48%	78%	43%
SOEC	0%	0%	3%	0%	2%
AEM	0%	0%	3%	0%	1%
Anden elektrolyseteknologi	15%	0%	12%	22%	23%
I alt	100%	100%	100%	100%	100%
Antal projekter	13	8	58	18	303

Kilde: (International Energy Agency, 2024), IEA Hydrogen Production projects database, www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#data-sets.

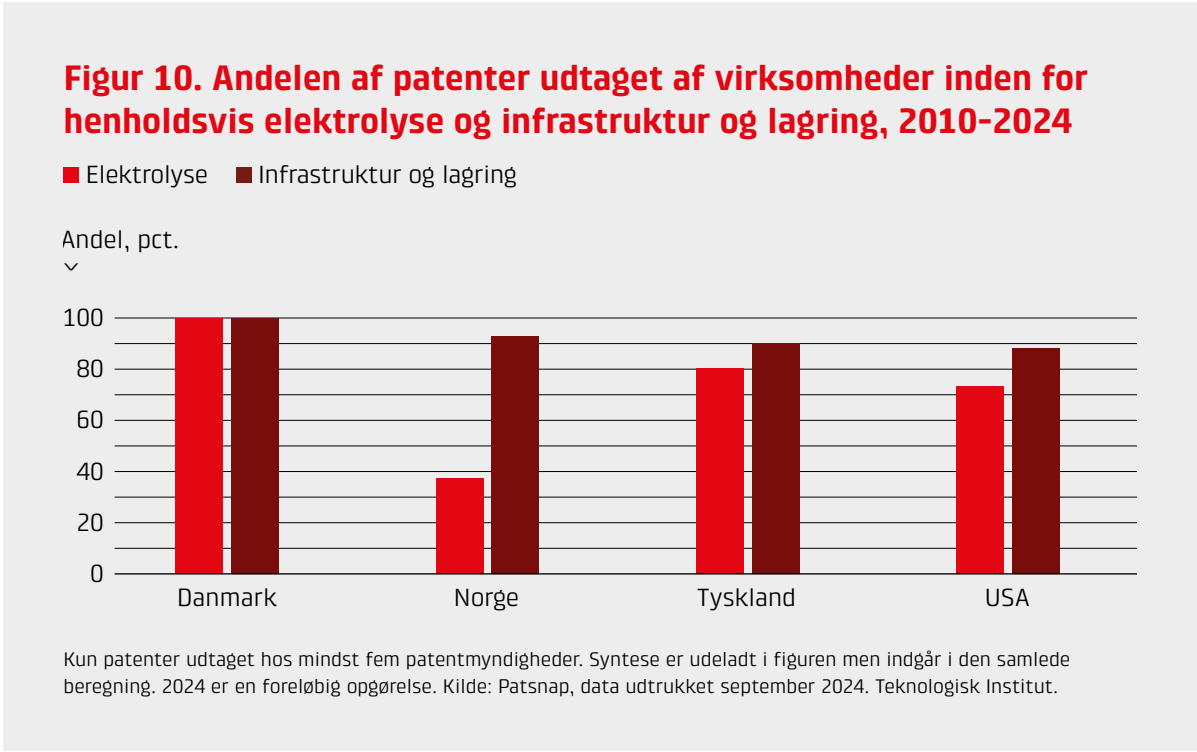


De mest patenterende aktører

Inden for PtX er det primært virksomheder, og ikke forskningsinstitutioner, der udtager patenter. Dette billede er uden tvivl forstærket af, at der kun er medtaget patenter, som er udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. Den stærke

industrielle dominans i patenteringsaktiviteten indikerer også, at PtX-teknologier er relativt modne, hvorfor industrien i høj grad tegner teknologiudviklingen inden for PtX (se figur 10).

Den industrielle dominans inden for patentering af PtX-teknologier kan yderligere nuan-



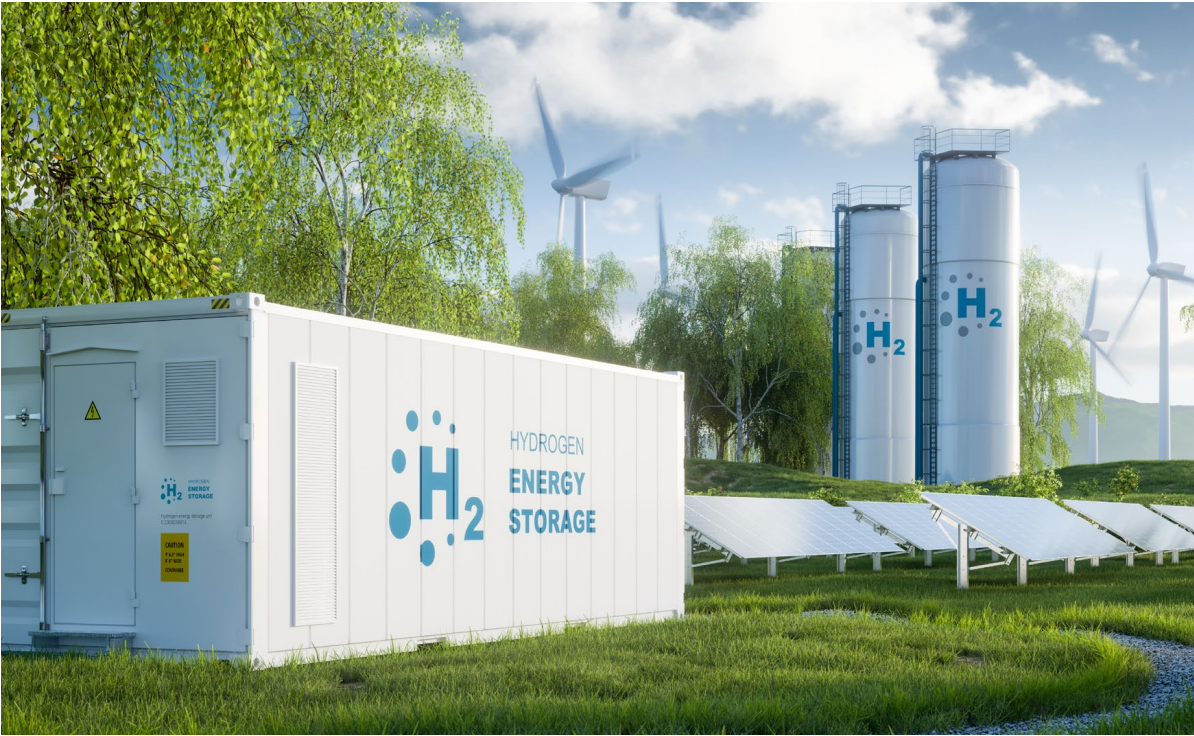
ceres ved at undersøge, hvem der har udtaget patenterne (se tabel 5, tabel 6, tabel 7 og tabel 8). Det giver anledning til følgende iagttagelser:

- Inden for både elektrolyse og infrastruktur og lagring er der generelt i Danmark, Norge, Tyskland og USA enkelte eller få virksomheder, der væsentligt oftere udtager patenter end andre. Disse virksomheder må derfor antages at være førende inden for teknologiudviklingen i både disse lande og internationalt, da deres patenter er udtaget hos flere patentmyndigheder. Her er således tale om internationalt orienterede, teknologiudviklende virksomheder.
- En lidt mere "ensidig" specialisering ses i Danmark og Norge. I Danmark dominerer Topsoe med hovedparten af patenterne inden for elektrolyse. Der er udtaget nogle patenter inden for infrastruktur og lagring i Danmark, men her tegner det norske selskab Nel Hydrogen AS sig for 10 ud af 13 patenter, så spørgsmålet er, om disse patenter repræsenterer norsk eller dansk funderet teknologiud-

vikling. I Norge er der derimod en del patenter inden for infrastruktur og lagring, men en svag patenteringsaktivitet inden for elektrolyse.

- I Tyskland og USA er der en del virksomheder, der driver teknologiudvikling inden for både elektrolyse og infrastruktur og lagring, og som således favner en større del af PtX-værdikæden. Om disse eller andre virksomheder også beskæftiger sig med teknologiudviklingen inden for andre områder af relevans for den samlede PtX-værdikæde (jf. figur 1), er ikke undersøgt.

Forskningsinstitutioner tager generelt færre patenter end virksomheder. I Danmark og Norge er forskningsinstitutioner fraværende, når det drejer sig om at lancere nye teknologiske løsninger, som de samtidig er villige til at forsvare bredt ved at udtage patenter i flere regioner (ved flere patentmyndigheder). Det betyder ikke nødvendigvis, at forskningsinstitutioner ikke spiller en vigtig rolle for den teknologiske udvikling inden for PtX, men blot en anden rolle. Dette vender vi tilbage til i næste afsnit om markedet.



I Tyskland og USA spiller forskningsinstitutioner en vis rolle. For Tysklands vedkommende er det i langt overvejende grad ikke-universitære forskningsinstitutioner (se tabel 7). Disse institutioner har en anvendelsesorienteret vinkling på deres FoU med et udbredt samarbejde med tysk erhvervsliv og ofte med en forankring ind i de universitære forskningsmiljøer

(Innovation Centre Denmark, Munich, 2021). I USA bidrager både universiteter og andre typer forskningsinstitutioner, hvoraf flere er blandt de førende inden for teknologiudvikling og/eller er beliggende i de dele af USA, hvor energiproduktion, herunder grøn energi, spiller en stor rolle.

Tabel 5. De mest patentende aktører i Danmark inden for elektrolyse og infrastruktur og lagring, 2010-

Elektrolyse		Infrastruktur og lagring	
Virksomheder	Patenter	Virksomheder	Patenter
Topsoe AS	22	Nel Hydrogen AS	10
Hymeth APS	7	H2 Logic	2
Siemens Gamesa Renewable Energy AS	4		
Hydrive APS	2		
Forskningsinstitutioner	Patenter	Forskningsinstitutioner	Patenter
-		-	

Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrukket september 2024. Teknologisk Institut

Tabel 6. De mest patentende aktører i Norge inden for elektrolyse og infrastruktur og lagring, 2010-2024

Elektrolyse		Infrastruktur og lagring	
Virksomheder	Patenter	Virksomheder	Patenter
Brage Innovation	1	Hexagon Technology AS (del af Hexagon Composites ASA)	19
Equinor Energy AS	1	Cryovac AS	2
Yara Inst. ASA	1	Hexagon Ragasco AS	2
		Lattice Int. AS	2
		Nel Hydrogen AS	1
		Statoil ASA Petro SA (NO)	1
Forskningsinstitutioner	Patenter	Forskningsinstitutioner	Patenter
-		Institutt for Energiteknikk	1

Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrukket september 2024. Teknologisk Institut

Tabel 7. De mest patentende aktører i Tyskland inden for elektrolyse og infrastruktur og lagring, 2010-2024

	Elektrolyse	Infrastruktur og lagring	I alt
Virksomheder		Antal patenter	
Siemes AG	30		30
Robert Bosch GmbH		15	15
Thyssenkrupp AG	11	3	14
Hydrogenious Tech GmbH	2	9	11
Linde AG	3	8	11
Doosan Lentjes GmbH	4	5	9
BASF SE	2	5	7
H TEC SYSTEMS	6		6
GKN Sinter Metals Eng GmbH		5	5
Airbus Defence & Space GmbH	3	2	5
Mercedes Benz Grp AG		5	5
Sunfire	4		4
MT Aerospace		4	4
Fuelsave GmbH	2	2	4
Forskningsinstitutioner		Antal patenter	
Zent für Sonnenenergie & Wasserstoff Forschung Baden Württemberg Gemeinnützige Stiftung	4	1	5
Frauenhofer Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung EV	3	2	5
Forschungszentrum Julich GbHH	3	1	4

Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrykket september 2024. Teknologisk Institut



Tabel 8. De mest patentende aktører i USA inden for elektrolyse og infrastruktur og lagring, 2010-2024

	Elektrolyse	Infrastruktur og lagring	I alt
Virksomheder		Antal patenter	
Air Prod & Chem INC	10	27	37
Praxair Tech INC		13	13
Calera Corp	10		10
Quantum Fuel Syst Tech Worldwide INC		8	8
United Tech Corp		8	8
Safe Hydrogen	3	4	7
Utility Global INC	6		6
The Boeing CO		6	6
Giner Life Sci. INC	5		5
Infinium Tech LLC	5		5
Kiverdi INC	5		5
Entegris INC		5	5
General Electric CO		5	5
Ovonic Battery CO INC		5	5
BASF CORP	3	2	5
3M Innovative Properties CO	4		4
Colormatrix HLDG	4		4
LTAG SYST LLC	4		4
Tescom CORP		4	4
Mcalister Tech LLC	4		4
Nanoptek CORP	4		4
Skyre INC	4		4
Forskningsinstitutioner		Antal patenter	
California Inst. of Tech.	4		4
Rgt. Univ. Of California	2	2	4
Ohio State Innovation Found	3	1	4
Arizona Board of Regents on behalf of the Univ. Of Arizona	3		3
Massachusetts Inst. of Tech.	2	1	3
Wisconsin Alumni Res Found	3		3

Kun patenter udtaget hos mindst fem patentmyndigheder. 2024 er en foreløbig opgørelse. Kilde: Patsnap, data udtrykket september 2024. Teknologisk Institut

Marked

Teknologiske styrker udspringer ikke blot af FoU, som det kommer til udtryk gennem forskningslitteratur og patenter. At gøre tingene i praksis og finde brugbare løsninger kan også være et tegn på en styrke, som fx har rod i nationale eller regionale økosystemer inden for specifikke teknologi- eller markedsområder. I det følgende vil vi undersøge de udvalgte landes industrielle strukturer og dynamikker, og om muligt se på PtX-industriens økonomiske aftryk.

Industriel struktur og dynamik

PtX er i de senere år trådt ind på den industrielle arena for produktion af grønne brændsler mv. En værdikæde, som er skitseret i figur 1, har set dagens lys, omend den udvikler sig forskelligt i de enkelte lande.

Danmark

Set ud fra PtX-virksomhedernes forretningsmæssige interesser er den danske værdikæde stærkt koblet både til adgang til grøn strøm og til forbrugssiden (se figur 11). Baggrunden for dette er bl.a., at virksomheder inden for mange forskellige brancher udviser interesse for PtX som en energikilde i den grønne omstilling (Teknologisk Institut, 2022). Her bør det tillige fremhæves, at Danmark, med en betydelig andel vedvarende energi fra bl.a. vindkraft, solceller og integrerede energisystemer, giver PtX gunstige forudsætninger, ligesom Danmark generelt set har teknologiske og markeds-mæssige kompetencer inden for vedvarende energi. Dette kommer tillige til udtryk ved, at Danmark inden for "grøn innovation" er karakteriseret som en region af "specialiseret/intensive green Innovators" med en markant

grøn teknologiudvikling og en arbejdsstyrke med grønne kompetencer (OECD, 2024).⁵

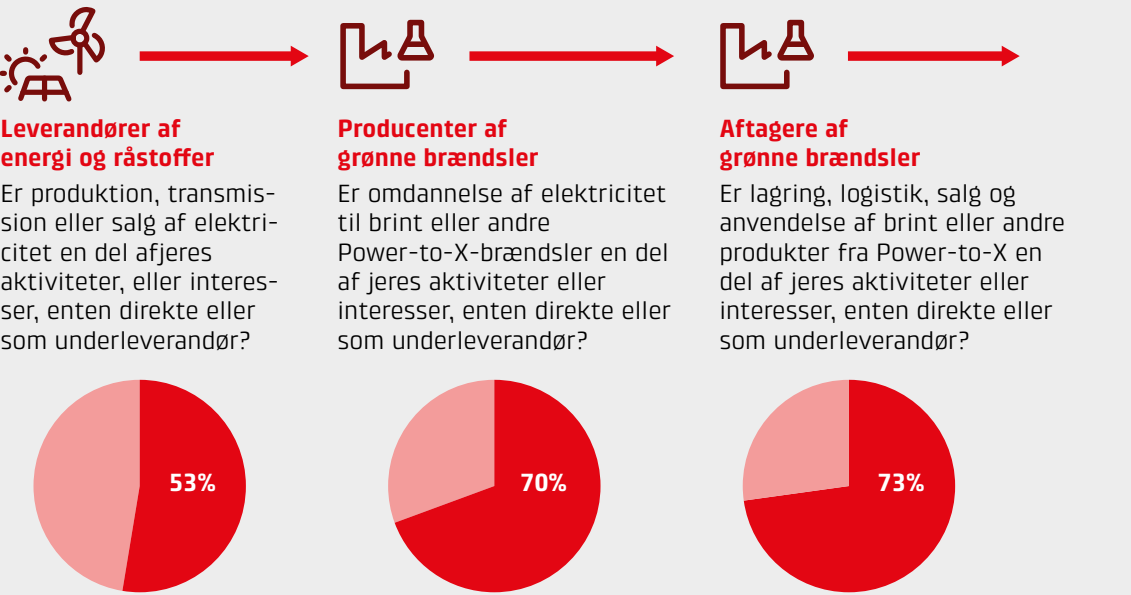
I Danmark er der en række virksomheder, der har specialiseret sig inden for udvikling af PtX-teknologier og etablering af produktionsanlæg. Der tegner sig således et billede af (Teknologisk Institut, 2024):

- Et stærkt **teknologisk udviklingsmiljø for elektrolyse med sigte på udvikling af teknologi til PtX-produktionsanlæg**. Flere danske virksomheder har markeret sig her, såsom Topsoe, Green Hydrogen System og Stiesdal. Hertil kommer, at sådanne virksomheder ikke bare er involveret i danske projekter til etablering af PtX-produktion, typisk brintproduktion, men også sælger til og er involveret i PtX-projekter på udenlandske markeder.
- Et stærkt **internationalt orienteret miljø for teknologi- og forretningsudvikling af PtX-produktionsfaciliteter**. Disse virksomheder fungerer typisk som developers både teknisk, drifts- og markeds-mæssigt samt finansielt. Virksomhederne er typisk engageret i PtX-projekter i Danmark og andre lande, hvor de ofte er etableret med lokale kontorer. Her finder vi bl.a. Copenhagen Infrastructure Partners (CIP), European Energy, GreenGO Energy og Ørsted. Ofte favner disse virksomheder ikke kun produktion af PtX-produkter, men også udvikling af teknologiløsninger inden for grøn strøm og/eller inden for infrastruktur og lagring.

Endelig forekommer der også i Danmark et **bredt og veludviklet samarbejde mellem værdikædens forskellige aktører**. Forskningsinstitutioner, inkl. GTS-institutterne, bidrager med ny

⁵ (OECD, 2024) identificerer tre typer af "green Innovation hubs": 1. "Large-scale green innovators": Førende bidragsydere til den grønne teknologiske udvikling samtidig med, at der ydes et afgørende bidrag til teknologiudvikling på mange andre områder. 2. "Specialised green innovators": Blandt topbidragsyderne med en specialisering inden for grøn teknologiudvikling og innovation. 3. "Intensive green innovators": Ikke-førende, men yder et betydeligt bidrag til udvikling af grøn teknologi.

Figur 11. Danske virksomheders forretningsmæssige interesser inden for PtX-værdikæden



Kilde: (Teknologisk Institut, 2022).

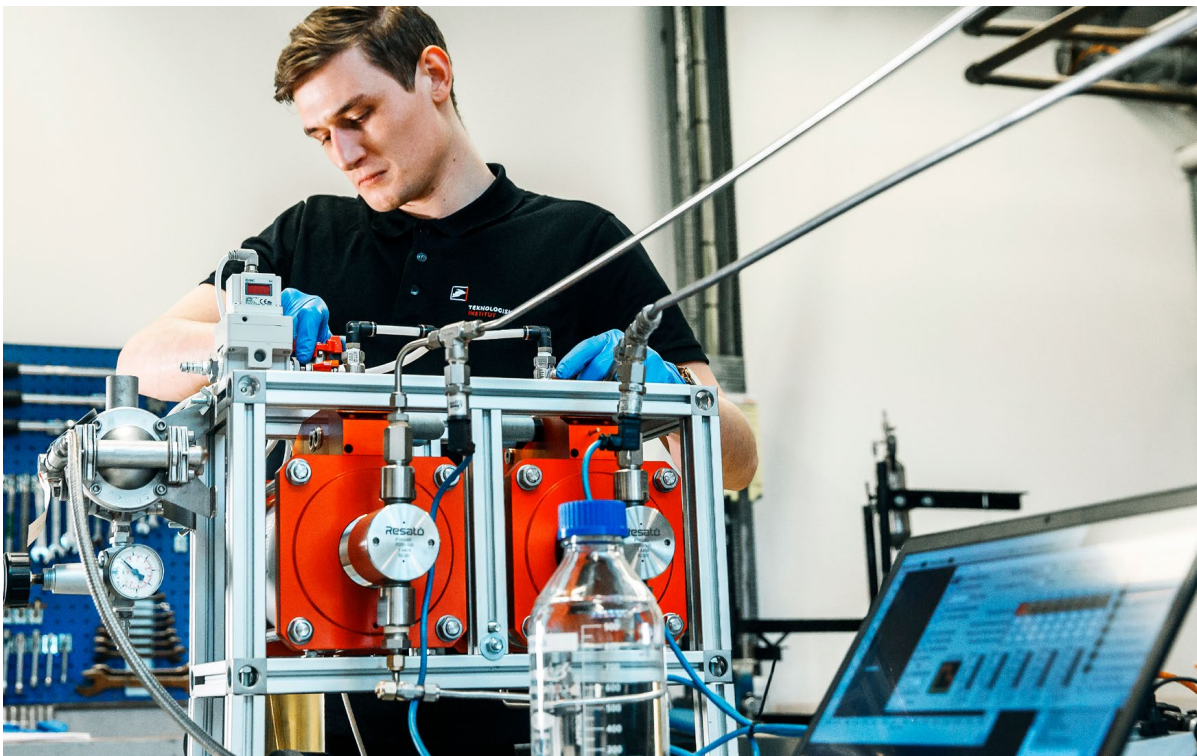
viden i konkrete projektsammenhænge, både i form af teknologiske udviklingsprojekter og i forbindelse med udvikling og etablering af PtX-anlæg.

Et stort antal partnere fra hele PtX-værdikæden engagerer sig i PtX-udviklingsaktiviteter inden for teknologi og samfund, for eksempel i regi af MUDP, EUDP, og Innovationsfonden,⁶ fx gennem MissionGreenFuels.⁷ Hertil kommer tiltag inden for specifikke sektorer, såsom Green

Ship of the Future (GSF)⁸ og klyngeinitiativet Green Power Denmark med værdikædefællesskabet for PtX.⁹

Ligeledes finder der et betydeligt FoU-samarbejde sted mellem universiteter og industri. GTS'erne tilbyder tillige teknologisk service og testfaciliteter.¹⁰ Endelig bygger mange af de seneste års demo-projekter og/eller projekter for etablering af produktionsfaciliteter på brede samarbejder i værdikæden.¹¹

⁶ www.groenprojektbank.dk og www.innovationsfonden.dk/en/news/new-research-and-innovation-partnership
⁷ www.missiongreenfuels.dk
⁸ www.greenship.org/about
⁹ www.greenpowerdenmark.dk/om-os/vaerdikaedefaellesskaber/PtX
¹⁰ www.teknologisk.dk/ydelser/PtX-test-og-udvikling-af-fremtidens-teknologier/44358 samt www.innovationsfonden.dk/da/news-article/ny-safe-and-faster-ptx-guideline-er og www.brandogskring.dk/nyheder/2024/ny-guide-skal-speede-PtX-op-og-minimere-uheld-ulykker-og-katastrofer
¹¹ www.brintbranchen.dk/brintprojekter-i-danmark. Tidligere var denne oversigt åbent tilgængelig.



Set udefra vurderer virksomheder fra Norge, Tyskland og USA, som har handlet eller samarbejdet med danske virksomheder, at det danske PtX-miljø er kendetegnet ved (procentandel som svarer i meget høj grad og i høj grad):¹²

- Produkter og service af høj kvalitet (94 %).
- En virksomhedskultur præget af troværdighed og pålidelighed (87 %).
- Et innovativt miljø for erhvervsudvikling og etablering af PtX-anlæg (82 %).
- Et stærkt forskningsmiljø inden for udvikling af PtX-teknologi (75 %).
- Omfattende erfaring med storskala-produktion af energi (65 %).
- Gunstige rammebetingelser for PtX-udvikling - forskning og innovation samt politiske incitamenter til etablering af PtX-produktion (57 %).

Bag flere af disse udsagn ligger, hvad repræsentanter for den danske PtX-industri på

vores workshop fremhævede som en dansk styrke, nemlig en særlig **samarbejdskultur** (Teknologisk Institut, 2024). Her blev det sagt, at Danmarks styrke ligger i evnen til tværfagligt samarbejde beroende på en lav hierarkisk struktur: "Vores virksomhedsstrukturer og vores lave hierarkiske systemer, vores gode dialog mellem virksomheder, leverandører og forskere og alt sådan noget, er det, som giver os en styrke." Hertil blev tilføjet, at vi har en holistisk forskningstilgang, hvilket forstås som en evne til at dække hele værdikæden inden for forskningen: "Vi kan både modellere fra atom til system, vi kan lave materialerne, vi kan lave komponenterne, vi kan karakterisere dem, vi kan teste dem."

Vender vi blikket mod virksomheder fra Norge, Tyskland og USA, som har handlet eller samarbejdet med danske virksomheder, er deres vurdering, at den danske PtX-industris interna-

tionale konkurrenceevne er karakteriseret ved: (procentandel som svarer i meget høj grad og i høj grad):¹³

- Rådgivning om integration af PtX i energisystemet, inklusive digitalisering og smart styring af energisystemet (67 %)
- Løsninger til effektiv produktion af grønne brændstoffer, dvs. katalysatorer og processer med højere konverteringseffektivitet (64 %)
- Teknologisk rådgivning og testfaciliteter (60 %)
- Udvikling af produktionsanlæg (produktionssteder), inklusive kapitalfremskaffelse og styring af etablerings- og/eller driftsfaser (55 %)
- PtX-produktionsteknologi og -anlæg, inklusive storskala-produktionsanlæg (totalleverandører) (50 %)
- Løsninger til effektiv elektrolyse, dvs. brintproduktion med høj effektivitet og lave omkostninger: (46 %).

Den danske PtX-industris internationale konkurrenceevne synes således at stå relativt stærkt inden for udvikling af synteseteknologier og systemintegration og svagere inden for udvikling og etablering af produktionsfaciliteter samt udvikling af elektrolyseteknologier.

Selvom Danmark har et stærkt vidensbaseret industrielt PtX-miljø, er ovenstående også tegn på, at Danmarks internationale konkurrenceevne er udfordret på nogle områder.

Norge

Norge, Norsk Hydro, har siden 1927 brugt brint i industriel produktion af gødning. Sidenhen er elektrolyseteknologien blevet videreudviklet af norske virksomheder som Nel Hydrogen, Norsk Hydro, Statkraft og Statoil (Equinor). I år 2000 førte det til udviklingen af brintproduktion med henblik på brug af brint som et alternativt drivmiddel for biler (Norwegian Hydrogen

Forum, 2024). Dette er ikke det eneste afsæt for udvikling af en PtX-industri. Norge har også stærke industrielle kompetencer til udvikling og drift af storskala energiproducerende anlæg i olie- og gassektoren. Endelig er regionerne i det sydlige og vestlige Norge også karakteriseret som "intensive green innovators" inden for grøn teknologiudvikling samt en arbejdsstyrke med grønne kompetencer (OECD, 2024).¹⁴

En kortlægning af den norske PtX-industri viser, at en PtX-værdikæde er under udvikling og som sådan danner grundlag for et **stærkt industrielt og teknologisk udviklingsmiljø**, der består af følgende aktører (Menon Economics, 2022a):

- Udstyrs- og teknologileverandører, der leverer dele eller hele produktionsanlæg samt teknologi til produktion og anvendelse af brint til hele værdikæden. Blandt virksomheder i denne gruppe finder man totalleverandører af produktionsanlæg, men også virksomheder der udvikler fx elektrolyseteknologi. I denne gruppe finder man bl.a. virksomhederne Nel Hydrogen og HydrogenPro.
- Producenter og distributører af forskellige PtX-produkter, primært brint, med distribution ved hjælp af trailere, rørledninger eller LNG-skibe. Rørsystemer anvendes primært på korte distancer. Med afsæt i fossil energiproduktion har Norge en stærk industriel platform til at inddrage PtX i den samlede portefølje af energiprodukter. Equinor, Norges største olie- og gasenergiselskab, har både grøn og blå brint som satsningsområder, hvor en betydelig markedsandel forventes at skulle nås gennem storskala-produktion af blå brint med rørledning til det europæiske marked.¹⁵ I efteråret 2024 vurderede Equinor dog, at rammevilkårene og markedet ikke er til stede for at investere i brintrør til trans-

¹³ Survey 2024, Teknologisk Institut. N=26. Svar blandt PtX-virksomheder i Norge, Tyskland og USA, som alle har forretningsmæssige relationer til Danmark.

¹⁴ Se fodnote 5.

¹⁵ Horisont Energi gennemfører et lignende projekt om blå ammoniak. www.horisontenergi.no/projects/barents-blue.

¹⁶ www.energiogklima.no/nyhet/equinor-legger-vekk-planene-om-eksport-av-blatt-hydrogen-til-europa

port af blå brint til Europa.¹⁶ Norsk Hydro har ligeledes etableret selskabet Hydro Havrand med fokus på produktion af grøn brint.

- Serviceleverandører – juridiske, økonomiske/finansielle, tekniske og forskningsbaserede ydelser – omfatter selskaber, der er orienteret mod forretningsudvikling og drift af PtX-faciliteter. Med 125 års erfaring som statslig energiproducent er Statkraft en af Europas førende inden for VE-produktion med aktiviteter inden for PtX. Aker Horisont er et industrielt investeringsselskab, der globalt udvikler grønne industri- og teknologiprojekter.

Herudover er der et **betydeligt FoU-samarbejde mellem forskning og erhvervsliv** om udvikling af PtX-løsninger, der kan bringe PtX-produkter ud i markedet. Gennem støtte til brintrelaterede udviklingsprojekter fremmer Forskningsrådet, Innovasjon Norge, Enova og Gassnova udviklingen af brintteknologi i hele værdikæden med deltagelse af industri og forskningsinstitutioner, specielt inden for temaet "brug og system"; dvs. projekter rettet mod anvendelse af brint og ammoniak, samt inden for fremstilling og processering af brint.¹⁷ Anvendelse af PtX-produkter er især målrettet den maritime sektor, landtransport og procesindustri. I forhold til skibsfart er der i 2022 igangsat såkaldte knudepunktsprojekter bestående af projekter til udvikling af produktionsanlæg og projekter til udvikling af nye skibstyper.¹⁸ Et eksempel er "ammonia fuel bunkering network", hvor ambitionen er at etablere et netværk af bunkringsterminaler til levering af grøn ammoniak til skibe i Norge og videre i Skandinavien.¹⁹

For at fremme den grønne omstilling med langsigtet forskning er der tillige etableret otte forskningscentre for miljøvenlig energi (FME).²⁰

To centre har særligt fokus på PtX. HyValue arbejder med helhedsorienterede løsninger inden for brint specielt rettet mod den maritime sektor. Hydrogeni fokuserer på udvikling af effektiv og skalerbar produktionsteknologi inden for brint og ammoniak.

En kortlægning af testfaciliteter viser, at der er en begrænset kapacitet, hvor hovedparten er rettet mod komponent- og materieltest og i mindre grad mod test i større skala og inden for produktion af PtX-produkter. Endelig er flere af testfaciliteterne ikke alment tilgængelige, da de ligger hos private aktører (Menon Economics, 2022b).

Tyskland

Historisk set har Tyskland en lang tradition for anvendelse og produktion af brint, især til opvarmning og i husholdninger, men også inden for industrien. Siden begyndelsen af det 20. århundrede har brint været en central komponent i den kemiske industri, især til produktion af ammoniak gennem Haber-Bosch-processen, som er afgørende i fremstillingen af gødning. Historisk set er brint primært blevet produceret ved dampreforming af naturgas, en proces, der medfører betydelige CO₂-udledninger. I lyset af Tysklands store industri og ambitiøse klimamål står landet således overfor en stor omstillingsopgave.

Tyskland er i færd med at etablere omfattende rammevilkår for implementering af grøn brint og PtX bestående af støtteordninger til at fremme investeringer, udvikling af infrastruktur og stimulering af efterspørgslen. Ifølge Tysklands nationale brintstrategi fra 2020 (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020) og (Green Power Denmark, 2020), er målet at opnå en elektrolysekapacitet på 5 GW inden 2030. I 2024 blev dette mål fordoblet til mindst



10 GW inden 2030, hvoraf en stor del skal importeres (The Federal Government, 2024).

Tyskland vil således investere i 9.700 kilometer brintrør, der skal forbinde tysk industri, havne og lagringsfaciliteter med produktionssteder til grøn brint, også fra fx Norge og Danmark (Danish Offshore industry, 2023) (The Federal Government, Germany, 2023). Det tyske program H2Global²¹ har til formål at fremme importen af grøn brint og PtX-produkter gennem langsigtede aftaler med internationale producenter. Initiativet skal ikke blot sikre Tyskland adgang til brint mv., men også understøtte udviklingen af en global brintøkonomi.

Internationalt set har Tyskland et stærkt forsknings- og industrielt udviklingsmiljø. Tyskland har tillige et godt afsæt for udvikling af PtX. Fire af i alt otte regioner i OECD karakteriseret som "specialised green innovators" er placeret i Tyskland. Disse regioner (delstater) er Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, og Hessen (OECD, 2024).²²

Når det gælder patentering, bidrager forskningen, og især ikke-universitære forskningsinstitutioner, bl.a. fra det sydlige Tyskland – fra

de ovennævnte delstater karakteriseret som "specialised green innovators" – til udvikling af PtX-teknologier, jf. tabel 7. Her må man dog ikke se bort fra, at der i det nordlige Tyskland også foregår betydelige aktiviteter omkring PtX blandt aktører som Airbus, Meyer, Lürssen, Blohm&Voss, ThyssenKrupp Marine, Salzgitter Stahl, GP Joule, m.fl.

De tekniske universiteter og ikke-universitære forskningsinstitutioner²³ markerer sig med en omfattende forskningsindsats, som i vid udstrækning bygger på et tæt samarbejde med industrien, ikke blot forankret i enkelte forskningsprojekter, men også organisatorisk gennem klynger og initiativer som "Industry on Campus" (Innovation Centre Denmark, Munich, 2021). Dette har yderligere manifesteret sig i forskellige samarbejdsmodeller inden for test og demonstration (Innovation Centre Denmark, Munich og Teknologisk Institut, 2022), hvor Energy Lab er en omfattende test- og udviklingsfacilitet for grønne teknologier, produktion og brug af grøn energi, herunder PtX.²⁴

Flere tyske forskningsinstitutioner og mange af de store industrifyrtårne er teknologisk i front inden for udvikling af PtX-teknologi til produk-

¹⁷ www.enova.no/heilo/hydrogen

¹⁸ www.enova.no/bedrift/hydrogen/na-skal-grunnmuren-for-satsningen-for-hydrogen-og-ammoniakk-til-maritim-sektor-bygges

¹⁹ www.azanefts.com

²⁰ www.forskningsradet.no/finansiering/hva/fme

²¹ www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2024/07/20240711-h2global.html

²² Se fodnote 5.

²³ Nogle af de ikke-universitære forskningsinstitutioner er også en del af de europæiske Research and Technology Organisations (RTOs), som typisk er mere forskningstunge end de danske RTO'er, dvs. de danske GTS-institutter. Se www.earto.eu/about-earto.

tion af brint og andre syntetiske brændstoffer samt infrastruktur, jf. tabel 7. De tyske forskningsorganisationer, Forschungszentrum Jülich og Karlsruhe Institute of Technology, arbejder fx tæt sammen med industrien for at udvikle avancerede løsninger inden for elektrolyse og katalyse, hvilket løfter teknologierne til et højt TRL-niveau.

Denne synergi mellem stærke industrielle aktører og specialiseret forskningsstøtte accelererer innovationen og modningen af bæredygtige energiløsninger i Tyskland, som har potentiale til at omforme energilandskabet i Europa og globalt. Forskning rettet mod den teknologiske udvikling inden for PtX er bl.a. fremmet gennem Kopernikus-projektet P2X, der støtter udvikling af PtX-teknologier, herunder elektrolyse, syntese mv.²⁵ Kopernikus-projektet P2X er organiseret omkring to forskningsklynger:

- **A-Cluster** har fokus på strømkonvertering, herunder elektrolyseprocesser til produktion af brint og syntesegas.
- **B-Cluster** har fokus på anvendelse og lagring af brint, PtX-brændstoffer og kemikalier, herunder life cycle sustainability assessment, og en overordnet roadmapping-proces, der samler og analyserer teknologiske, økonomiske, økologiske og samfundsmæssige data med henblik på at guide projektets retning og prioriteter.²⁶

Kopernikus-projektet P2X samler et konsortium bestående af 42 partnere fra både industri og forskning, som bidrager med henholdsvis industriel ekspertise inden for kemisk produktion og energiteknologier og med viden om fundamentale teknologier inden for elektrolyse og syntetiske brændstoffer. Teknologisk spænder Kopernikus-projektet P2X fra udvikling af højtemperatur-elektrolyseprocesser og syntese af e-kerosen til luftfart og produktion

af syntetiske kemikalier til industrien. Projektet sigter desuden mod at demonstrere teknologiernes anvendelighed i stor skala og deres integration i eksisterende energisystemer (Biermann & Boumrifak, 2022).

USA

USA har en lang historie med produktion og anvendelse af brint og ammoniak, primært inden for industrien. Traditionelt er brint blevet fremstillet gennem dampreforming af naturgas, en proces der udleder betydelige mængder CO₂. Brint har været anvendt i raffinaderier til hydrogenering og afsvovling af olieprodukter samt i den kemiske industri. Til brug i fremstilling af gødning har USA siden begyndelsen af det 20. århundrede produceret ammoniak ved hjælp af Haber-Bosch-processen, hvor brint og kvælstof kombineres under højt tryk og høj temperatur.

USA har mange forskningsorganisationer og virksomheder, der er aktive inden for PtX-forskning. Det er især store industrigiganter, såsom Exxon-mobile, 3M og general Motors, der engagerer sig i PtX-forskning og teknologiudvikling,²⁷ ligesom flere af landets "national laboratories" er meget aktive, såsom Oak Ridge National Laboratory, Georgia Institute of Technology, Lawrence Berkeley National Laboratory, National Renewable Energy Laboratory og Argonne National Laboratory.

USA er på mange områder blandt de globalt førende inden for teknologiudvikling og innovation, og det gælder også inden for grøn teknologi, herunder PtX. Uden at være specialiseret inden for specifikke grønne teknologier er ni regioner (delstater) - Californien, Texas, Massachusetts, New York, New Jersey, Pennsylvania, Illinois, Ohio og Florida - karakteriseret som "large scale green innovators" (OECD, 2024).²⁸

Specielt med fokus på at fremme PtX yder Regional Clean Hydrogen Hubs Program (H2Hubs) – som en del af Infrastructure Investment and Jobs Act (Public Law 117-58), også omtalt som bipartisan infrastructure law²⁹ – milliardstøtte til udvikling af kommercielle brintøkosystemer i stor skala. H2Hubs har således til formål at skabe netværk af brintproducenter, forbrugere og distributører (infrastruktur) med henblik på at accelerere brugen af brint og PtX-brændsler. H2Hubs har i dag udvalgt syv brinthubs på tværs af USA, hvor flere er sammenfaldende med de ovennævnte delstater, der er karakteriseret som "large scale green innovators".³⁰ Disse områder har også tiltrukket den danske PtX-industri, både som en forretningsmulighed og en mulighed for at fremme egen teknologiudvikling. Her har Texas – med en betydelig erfaring inden for energiproduktion – især tiltrukket sig danske PtX-virksomheders interesse.³¹

For at fremme USA's strategi for grøn omstilling, herunder udvikling af PtX, er der lanceret flere initiativer såsom:

- **Hydrogen Energy Earthshot (Hydrogen Shot):** Et initiativ der skal fremme udviklingen af PtX-teknologier gennem innovation og investeringer, bl.a. ved at reducere omkostningerne ved ren brintproduktion til USD 1 pr. kg. inden for et årti.³²
- **Inflation Reduction Act (IRA):**³³ Har siden 2022 introduceret skatteincitamenter, lån og subsidier til ren energi, herunder brintproduktion, med mulighed for udviklings- og infrastrukturprojekter inden for PtX.

Den nationale brintstrategi og roadmap har til formål at følge implementeringen af disse

initiativer samt at skabe dialog og samarbejde mellem statslige og føderale myndigheder og alle aktører i den samlede PtX-værdikæde (U.S. Department of Energy, 2023).

Selvom USA har implementeret flere initiativer til fremme af PtX, bemærkes det, at implementeringen af nogle initiativer, såsom brintprojekter, har været langsommere end forventet på grund af regulatoriske udfordringer og kompleksiteter i implementeringen.³⁴

USA's omfattende og varierede energimarked giver mulighed for at afprøve forskellige forretningsmodeller for PtX. Landets energimix inkluderer en betydelig andel af vedvarende energi, hvilket er essentielt for produktionen af grøn brint og syntetiske brændstoffer (International Energy Agency, 2024).

Samlet set er USA's store virksomheders engagement, det diversificerede energimarked og den politiske støtte en stærk platform for udviklingen af PtX-teknologier. Med villigheden til at yde direkte statsstøtte rummer det også mulighed for, at USA kan blive førende i kommercialiseringen af PtX. Dette gør USA særligt attraktivt pga. de muligheder, det skaber for danske virksomheder.

Økonomisk performance

Da PtX-teknologien og dermed PtX-industrien – den samlede PtX-værdikæde – er i en forholdsvis tidlig kommerciel udviklingsfase, vil det økonomiske aftryk være beskedent. PtX-industrien vil således næppe fremstå som en erhvervsøkonomisk styrkeposition, men

²⁹ www.whitehouse.gov/build/guidebook

³⁰ www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0

³¹ Flere danske PtX-virksomheder har etableret sig i Texas, bl.a. Ørsted, Topsoe, Copenhagen Infrastructure Partners European Energy, Vestas og Ammongas. (Berlingske Business, 24. oktober 2024), greenpowerdenmark.dk/nyheder/usa-tager-teten-paa-power-to-x, www.danskerhverv.dk/presse-og-nyheder/nyheder/2024/september/usas-gronne-omstilling-abner-dore-for-danske-virksomheder og www.danskindustri.dk/arrangementer/soeg/arrangementer/internationalt---nordamerika-og-canada/texas-wind-energy

³² www.energy.gov/topics/energy-earthshots-initiative og www.energy.gov/topics/hydrogen-shot

³³ www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook

³⁴ www.reuters.com/sustainability/climate-energy/us-climate-law-has-boosted-solar-batteries-hydrogen-other-initiatives-lag-2024-04-02

²⁴ www.elab.kit.edu

²⁵ www.kopernikus-projekte.de/en/projects/p2x

²⁶ www.itas.kit.edu/english/projects_paty16_kopp2x.php

²⁷ www.investors.com/news/hydrogen-energy-fuel-cars-green-hydrogen-hub

²⁸ Se fodnote 5.

økonomiske indikatorer giver et fingerpeg om, at de grønne vækstambitioner også aftegner sig kommercielt.

PtX-værdikæden består af virksomheder fra en række forskellige brancher. Almindelig erhvervsstatistik kan ikke give data om PtX-værdikæden. Undersøgelser af PtX-værdikæden må derfor basere sig på specialiserede undersøgelser med brug af surveys eller dataudtræk fra virksomhedsdatabaser.

Den første observation er, at en PtX-værdikæde i de fire fokuslande er under udvikling med virksomheder, der repræsenterer forskellige dele af værdikæden (se ovenfor). Antallet af virksomheder er relativt beskedent, og det samme gælder for den samlede beskæftigelse (se tabel 9).

En gennemgang af virksomhederne peger på, at mange af virksomhederne, ikke kun i Danmark, men også i de andre lande, ikke alene har PtX som deres forretningsområder, men også adresserer andre markeder, ofte inden for energiforsyning.

Inden for PtX viser en rundspørge, at ca. halvdelen af de danske PtX-virksomheder har teknologiudvikling som et kerneområde, dvs.

udvikling af PtX-teknologier og produktionsanlæg (Teknologisk Institut, 2024), mens de norske virksomheder i højere grad er orienteret mod at levere udstyr og produktionsanlæg (se figur 12). Ovenstående analyser af forskning og patentering indikerer, at Danmark står stærkere inden for teknologiudvikling end Norge.

Tyskland og USA er, med deres store industrier og politiske satsninger på især grøn brint, placeret stærkt som teknologiudviklere og markeder for PtX.

I Tyskland bidrager store industrielle aktører og forskningsorganisationer afgørende til udviklingen af PtX-teknologier. Tysklands industrielle struktur er således præget af en diversificeret økonomi med stærke sektorer inden for bilindustri, maskinbygning, kemisk industri og elektrisk udstyr.³⁵ Disse sektorer udgør rygraden i landets økonomi og er domineret af både store globale virksomheder, som Volkswagen, BASF og Siemens, og den tyske 'Mittelstand', som en drivkraft for innovation og teknologiudvikling (Deutschland.de, 2024). Industriens tilstedeværelse giver ikke kun økonomisk styrke og adgang til betydelige kapitalressourcer; den bringer også omfattende erfaring med at udvikle og implementere – opskalere – ny teknologi i store industrielt baserede udviklings-

³⁵ www.tradingeconomics.com/germany/industrial-production

Tabel 9. Estimat over størrelsen af den samlede PtX-værdikæde

	Antal aktører i værdikæden	Beskæftigelse inden for PtX
Danmark (2022)	140	1.100 medarbejdere
Norge (2021)	120	815 årsværk
Tyskland	340	2.300 - 2.700*
USA	1.300	8.800 – 10.200*

* Beskæftigelsen inden for PtX i Tyskland og USA er estimeret ud fra beskæftigelsesdata for Danmark og Norge og er således usikre.

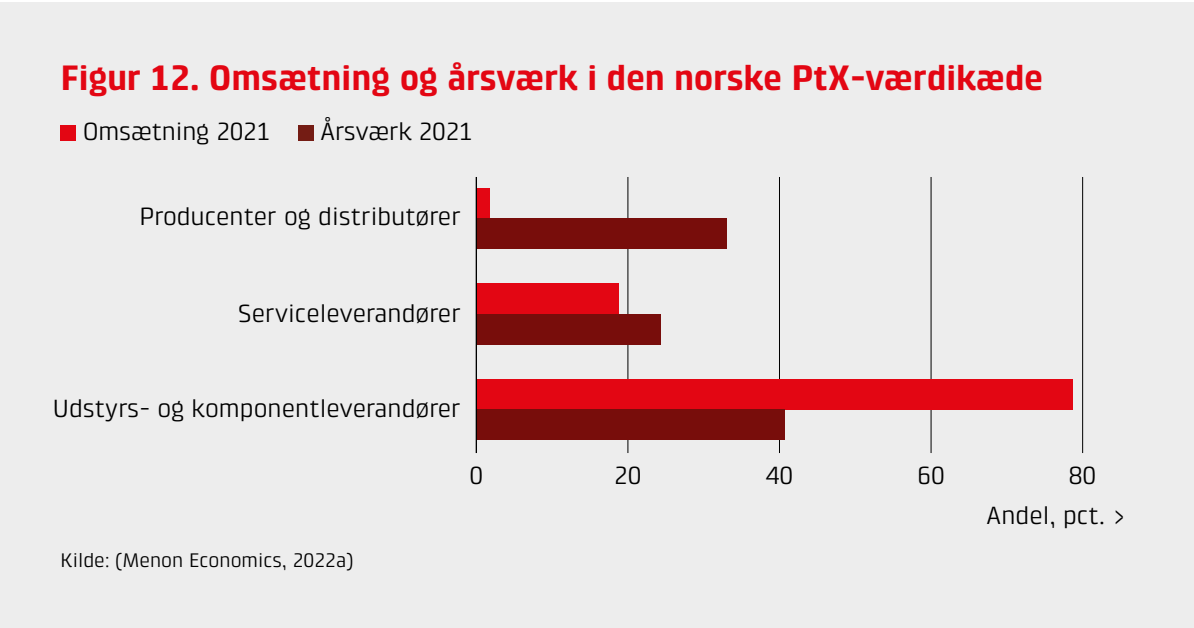
Data udtrukket fra den internationale virksomhedsdatabase Crunchbase. Virksomhedernes relevans for PtX er efterfølgende tjekket, fx gennem hjemmesider. Kilde: Danmark: (Teknologisk Institut, 2022) og Crunchbase; Norge: (Menon Economics, 2022a); Tyskland og USA: Crunchbase.

projekter. Tyskland udmærker sig også ved en velorganiseret indsats blandt forskningsinstitutioner, større energi- og forskningsvirksomheder og andre industrier, blandt andet med Kopernikus-projektet P2X, nævnt ovenfor.

USA er inden for den grønne omstilling, herunder PtX, langt fremme, når det glæder forskning og innovation. Med udpegning af regionale brinths (H2Hubs) og en række initiativer, der kan afhjælpe den økonomiske usikkerhed, ser det ud til, at USA har skabt rammer for både en teknologisk og en markedsfølsom udvikling, der kan bane vejen for PtX.

Gennem de senere år har mange PtX-projekter set dagens lys med henblik på at udvikle og etablere produktionsanlæg, især inden for elektrolyse- (brintproduktion) men også synteseanlæg (ammoniak mv.) (se tabel 10). Det generelle billede er, at hovedparten af anlægsprojekterne endnu ikke er kommet i drift, ligesom der kan være usikkerhed om, hvornår den endelige investeringsbeslutning bliver taget (Teknologisk Institut, 2024).

Danmark har været relativt tidligt ude og har i dag en betydelig andel af projekter, der allerede er i drift. Danmarks PtX-projektportefølje lig-



Tabel 10. Portefølje af PtX-anlægsprojekter efter status, 2024

	I drift	FID/under opførelse	Feasibility study	I alt	Antal projekter
Danmark	38%	21%	41%	100%	34
Norge	18%	20%	62%	100%	55
Tyskland	41%	25%	35%	100%	142
USA	23%	22%	55%	100%	118
Alle	22%	20%	59%	100%	1522

Koncept- og demo-projekter er ikke medtaget. FID: Final Investment Decision. Kilde: (International Energy Agency, 2024), IEA Hydrogen Production Projects Database, www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#data-sets

ger på linje med Tyskland, mens Norge og USA har langt flere projekter under udvikling, dvs. at de er genstand for et feasibility-studie.

Danmark og Norge repræsenterer hver især to ret forskellige PtX-projektporteføljer, hvilket kan føres tilbage til forskellige udgangspunkter for udviklingen af deres respektive PtX-projektporteføljer.

På det seneste har der været en betydelig usikkerhed om PtX, hvilket i Danmark er kommet til udtryk ved en usikkerhed om adgangen til grøn strøm og forretningsmodellen i det hele taget (Teknologisk Institut, 2023). Dette har givetvis påvirket udviklingen af den samlede projektportefølje. Blandt 17 PtX-produktionsanlæg, som blev meldt ud i regeringens PtX-strategi i 2021, viser en status offentliggjort oktober 2024, at 3 anlæg er i drift, 1 anlæg følger tidsplanen, mens 12 anlæg enten

er forsinket eller tvivlsomme. Et anlæg er foreløbigt opgivet (Hansen, 2024). Usikkerhed om investeringer i kommende PtX-anlæg kan også have en afsmittende effekt på teknologiudviklere og leverandører af PtX-anlæg. Green Hydrogen System har således nedjusteret deres forventninger til omsætningen i 2024 grundet manglende kommerciel fremdrift (faldende omsætning for 2024) og risiko for annulleringer af ordrer.³⁶

Den norske projektportefølje er noget større end den danske, og den er orienteret mod produktion og distribution. Aftagersiden synes stærkere integreret, ligesom PtX ikke kun ses som produceret ud fra grøn strøm, men også fra naturgas (Menon Economics, 2022a). Alt andet lige giver det en større grad af forretningsmæssighed sikkerhed og incitament til at lancere nye projekter.

³⁶ www.euroinvestor.dk/nyheder/dansk-brintvirksomhed-i-problemer-fyrer-100-ansatte-og-nedjusterer. 11. oktober 2024



Perspektivering – vurdering af de danske styrker inden for PtX

PtX har potentiale til at spille en central rolle i den grønne omstilling. PtX-produkter er nemlig en løsning på udfasning af fossile brændsler på områder, hvor elektrificering er vanskelig, eller de kan anvendes til en grøn produktion af fx gødning og plast. PtX står dog over for flere udfordringer, såsom udvikling af effektive industrielle produktionsanlæg og realisering af nationale strategier for den grønne omstilling, herunder samfundsomkostninger i fx infrastruktur. Se (Berlingske Business, 28. september 2024).

Uagtet udfordringerne rummer den grønne omstilling også erhvervsøkonomiske muligheder. Samfundsøkonomisk forskning peger på, at et land eller en region, der tidligt formår at gennemføre strukturelle omstillinger og fremme investeringer inden for nye vækstområder, vil have større sandsynlighed for at lykkes med at gøre den grønne omstilling til et grønt vækstområde (Menon Economics, 2022a).

Danmark har en række styrker inden for PtX, som giver, eller potentielt kan give, danske virksomheder en konkurrencefordel til globalt at levere løsninger til den grønne omstilling.

Med afsæt i de identificerede styrker vil vi her diskutere mulighederne for at fastholde og videreudvikle de danske PtX-styrker, så den danske PtX-industri kan opnå konkurrencefordele på et globalt marked.

Danske styrker

Danmarks industrielle miljø inden for PtX besidder i en international sammenligning en række styrker, som opsummeret er:

Forskningsmæssig styrke:

- Danmark er inden for PtX blandt de mest publicerende lande i verden i forhold til antal indbyggere.
- Dansk PtX-forskning har stor impact ved at have den fjerdehøjeste citationsscore i verden inden for PtX-forskning som helhed.

Teknologisk styrke inden for elektrolyse:

- Inden for dansk PtX-forskning handler 4 ud af 10 forskningsartikler om elektrolyse. Synthese og lagring er to forskningsområder, som hver især tegner sig for 1 ud af 10 artikler, mens materialer tegner sig for 4 ud af 10 artikler inden for PtX-forskning.

- Dansk forskning i elektrolyse har i en international sammenligning den fjerdehøjeste citationsscore, hvilket er en indikation på, at denne forskning har en høj impact. Det gælder ikke for forskningsområderne syntese, lagring og materialer.
- Tre fjerdedele af alle danske patenter inden for PtX omhandler elektrolyse, mens de store lande har en mere ligelig fordeling af patenter mellem henholdsvis elektrolyse og infrastruktur og lagring. Norge har derimod en overvægt af patenter inden for infrastruktur og lagring.
- Inden for elektrolyse har Danmark udtaget relativt få patenter på alkalisk elektrolyse, men langt flere inden for PEM og SOEC. Særligt inden for SOEC peger dette i retning af en international styrkeposition, idet hvert fjerde patent inden for SOEC i perioden 2010-2024 er dansk. Selvom der globalt set er udtaget få patenter inden for SOEC, kan det muligvis have et teknologisk udviklingspotentiale.
- Blandt igangsatte hydrogenprojekter (anlægsprojekter) i Danmark er alkalisk elektrolyse den absolut mest anvendte teknologi. Andre lande har i betydelig grad også taget PEM i anvendelse, mens SOEC ikke i øjeblikket spiller nogen nævneværdig rolle.

Et stærkt industrielt udviklingsmiljø med fokus på både forskning og innovation:

- I forhold til alle andre lande deltager dansk industri oftere i forskningssamarbejde med universiteter mv.
- Når det gælder levering af PtX-teknologier, og især den dertil hørende teknologiudvikling, står Danmarks industri stærkt, især inden for elektrolyse samt udvikling og etablering af PtX-anlæg gennem internationalt orienterede developers.
- Danmark har et udbredt værdikædesamarbejde, herunder et samarbejde mellem forskning og industri, som er essentielt for udvikling og etablering af PtX-anlæg, især mht. sektor-kobling og inddragelse af grøn strøm.

- I Danmark er der relativt mange PtX-anlægsprojekter i drift. Den samlede portefølje af PtX-anlægsprojekter med status som enten feasibility study, FID/under opførelse eller i drift er imidlertid relativt lille, da antallet af projekter under udvikling er beskedent set i forhold til andre lande. Hertil kommer, at flere projekter i øjeblikket er forsinket eller anses for usikre.

Ved at se til Norge, Tyskland og USA synes Danmark udfordret på skalering af PtX-teknologi, herunder etablering af større produktionsanlæg. Her tilkommer, at disse lande har større fokus på at få PtX bragt op på et industrielt niveau og få PtX-produkterne ud i markedet, hvor de kan indgå i den grønne omstilling af industri- og transportsektorerne.

Et internationalt udsyn

Virksomhedsledere inden for PtX i Norge, Tyskland og USA, som tillige har forretningsmæssige relationer til Danmark, har rangeret ti lande inden for PtX. Danmark kommer ind på en fjerdeplads, både når det gælder udvikling af PtX-teknologier og etablering og drift af produktionsfaciliteter (se figur 13 og figur 14). USA, Tyskland og Japan er rangeret højere end Danmark i nævnte rækkefølge, mens Danmark rangeres højere end Norge. Alt andet lige bekræfter dette ovenstående analyser i, at Danmark er godt med inden for PtX.

Globalt set går langt hovedparten af PtX-investeringerne til etablering af elektrolysefaciliteter, og kun en mindre del til udbygning af infrastruktur til distribution og lagring (se tekstboks 2). Dette investeringsmønster tegner i høj grad også situationen i Danmark. Samtidig indikerer det, at fokus er på den teknologiske udvikling med sigte på at etablere større og mere effektive produktionsfaciliteter. Spørgsmålet er, om dette investeringsmønster er ude af balance forhold til at introducere PtX til markedet.

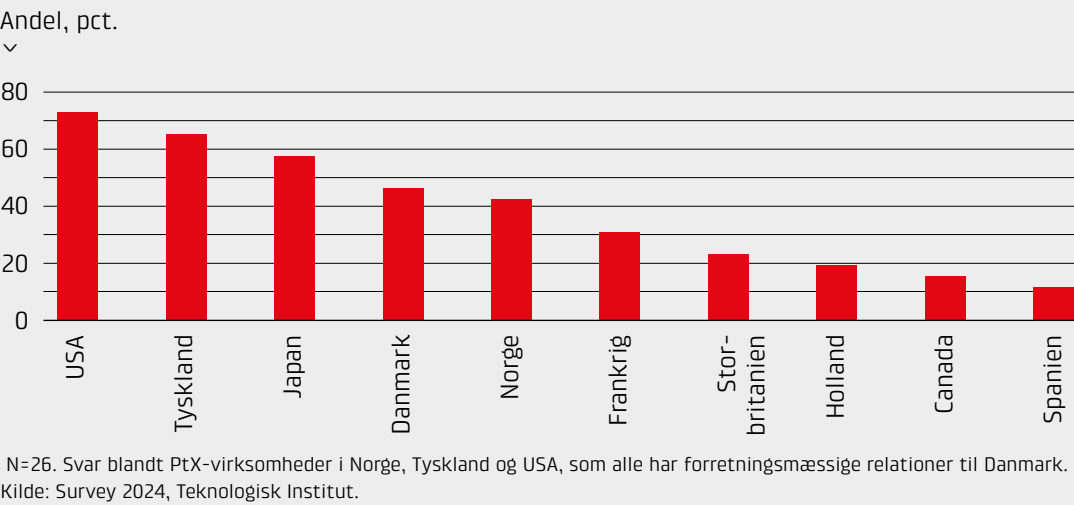
I ovenstående analyser træder Kina ikke rigtigt frem, selv ikke blandt de adspurgte PtX-virksomheder i Norge, Tyskland og USA, jf. figur 13 og figur 14.

Generelt set spiller Kina dog en stadig større rolle inden for teknologiskudvikling. Senest har

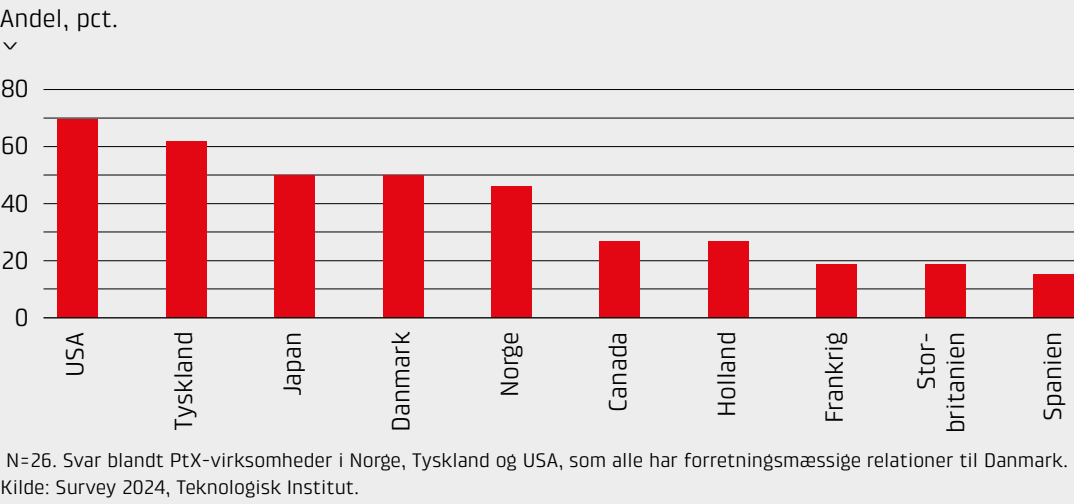
Australian Strategic Policy Institute fundet, at Kina er førende inden for 57 ud af 64 kritiske teknologier, heriblandt "hydrogen and ammonia for power" efterfulgt af EU og USA (Jennifer Wong Leung, 2024).³⁷ International Energy

³⁷ Se også ad-aspi.s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/2024-10/eu_top_5_snapshot.pdf

Figur 13. Blandt 10 lande er følgende vurderet som førende inden for udvikling af PtX-teknologier



Figur 14. Blandt 10 lande er følgende vurderet som førende inden for etablering og drift af PtX-produktionsfaciliteter



Agency peger også på, at Kina gør betydelige investeringer i PtX (se tekstboksen).

På workshoppen med repræsentanter for den danske PtX-industri blev der rejst en bekymring over Kinas hastige fremskridt, hvor opbygning af erfaring og kompetencer med drift af produktionsanlæg i storskala spiller en større rolle end kortsigtede gevinster. Det kan betyde, at Kina kan blive en konkurrencemæssig trussel ved hurtigere at opbygge teknologiske og

driftsmæssige kompetencer til introduktion af PtX i markedet (Teknologisk Institut, 2024).

Perspektiver for de danske styrker

Den grønne omstilling og lavere energipriser er vigtige for Europas konkurrenceevne (Draghi, 2024a). Ifølge Draghi-rapporten står EU over for flere udfordringer, før teknologier som PtX kan

Tendenser i de globale investeringer inden for PtX

I 2023 investerede projektudviklere globalt 3,5 milliarder USD i projekter under opførelse inden for brintforsyning. Omkring 80 % af investeringerne blev anvendt til at bygge elektrolysefaciliteter, mens resten blev brugt på projekter, der kombinerer brintproduktion med kulstofopsamling, -udnyttelse og -lagring af CO₂ (CCUS). For elektrolyse var det en stigning på 350 % sammenlignet med 2022, mest udtalt for industrien og raffinaderisektoren. Udgifterne til infrastrukturprojekter – rørledninger, oplagring og tankning – er fortsat på et meget lavere niveau.

Produktionskapaciteten for elektrolyseanlæg er fordoblet i 2023 til en samlet kapacitet på 25 GW/år, hvor Kina tegnede sig for 60 %. Denne kapacitet er langt fra udnyttet med en produktion på kun 2,5 GW i 2023. Med udgangspunkt i projekter med endelig investeringsbeslutning (Final Investment Decision – FID) eller under opførelse, kan kapaciteten nå op på mere end 40 GW/år i 2024. Projektporteføljen frem



til 2030 er estimeret til en produktionskapacitet på mere end 165 GW/år, hvoraf 30 % har opnået FID.

I 2023 tegnede Kina sig for halvdelen af de samlede investeringer i elektrolyseprojekter, mens Europa stod for en tredjedel. Når Kina fører an på årlige investeringer, skal det ses på baggrund af det store antal projekter og størrelser af projekterne, som opvejer det lavere omkostningsniveau. Hvis alle kinesiske projekter, der har fået tilsagn om den endelige investeringsbeslutning, leveres som planlagt, vil udgifterne stige med 140 % i 2024. Udgifterne til brintprojekter udstyret med CCUS var højest i Nordamerika.

Egen oversættelse. Kilde: (International Energy Agency, 2024).

få en central rolle. Disse udfordringer er bl.a. (Draghi, 2024b):

- Høje omkostninger ved at udvikle og implementere elektrolyseteknologi samt høje elpriser, der gør det økonomisk svært at producere brint uden støtte.
- Det er dyrt at transportere brint. Infrastrukturen skal forbedres, og der skal skabes stærke industriklynger for at gøre det mere konkurrencedygtigt.

Draghi's studie fremhæver tillige, at fokuserede og øgede investeringer i forskning og innovation er vitale parametre for at realisere målet om en større andel af PtX-produkter i markedet.

Australian Strategic Policy Institute – som blev nævnt ovenfor i forbindelse med udpegningen af de førende lande inden for kritiske teknologier – påpeger, at det at opnå og opretholde videnskabelig og forskningsmæssig ekspertise ikke er en vandhane, der kan tændes og slukkes for. Ofte har lande reduceret eller stoppet investeringer i forskning og udvikling samt produktionskapacitet på områder, hvor de ellers kunne have haft en langsigtet konkurrencefordel. Dette har ført til tab.³⁸

Med den danske PtX-strategi blev der lanceret en ambitiøs plan for implementering af PtX i Danmark (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2021) med et stort erhvervspotentiale (Rambøll, 2021). De danske erhvervspotentialer og dermed de danske PtX-styrker synes imidlertid udfordret,³⁹ da udbygningen af produktionskapaciteten til grøn strøm⁴⁰ går langsomt, ligesom etableringen af brintinfrastrukturen –

herunder et brintrør til det tyske marked⁴¹ – er udskudt, men senest besluttet i ny og kortere version fra Esbjerg.⁴² Så et spørgsmål må dog stadig være, hvordan de danske PtX-styrker kan fastholdes og styrkes.

Med andre ord: Hvilke tiltag kan gøres, når de danske PtX-leverandører er udfordret med hensyn til adgangen til grøn strøm og brintinfrastruktur samt har vanskeligheder med forretningsmodellen generelt, samtidig med at Danmark gerne vil fastholde den danske PtX-industri som leverandør af PtX-teknologi, baseret på erfaringer opnået gennem PtX-projekter? De politiske ambitioner er til stede, men andre lande synes ikke at tøve.

Ser vi på Norge, Tyskland og USA synes der at være en betydelig erkendelse af, at implementering af PtX både teknologisk, industrielt og markedsmæssigt er ganske komplekst, og at denne kompleksitet og de tilhørende risici har en afsmittende indvirkning på investeringsviljen. Lanceringen af The Regional Clean Hydrogen Hubs program (H2Hubs) i USA er en illustration af, hvordan man kan imødekomme væsentlige barrierer med udvikling og implementering af PtX. Programmets mål er:⁴³

- At håndtere barrierer og reducere risici med henblik på at fremme nyttiggørelse/implementering og kommercialisering.
- At skabe netværk mellem PtX-producenter, udbydere af infrastruktur og forbrugere for at fremme brug af PtX-produkter især i sektorer, hvor det er vanskeligt at udfase fossile brændsler (tunge industrier (stål- og cementproduktion) og tung transport.

³⁸ www.aspi.org.au/report/aspis-two-decade-critical-technology-tracker
³⁹ www.mm.dk/artikel/skaebnestund-for-danmarks-brinteventyr
⁴⁰ www.dr.dk/nyheder/seneste/energi/oe-i-nordsoeen-udskydes-med-mindst-tre-aar
⁴¹ www.dr.dk/nyheder/indland/dansk-brintror-til-tyskland-forsinkes-i-flere-aar
⁴² www.dr.dk/nyheder/politik/flertal-aftaler-brintror-til-tyskland-ved-brug-af-statsstoette og via.ritzau.dk/pressemeddelelse/14244549/brintroret-bliver-en-kaempe-gevinst-for-danmark
⁴³ www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0 og www.energy.gov/sites/default/files/2024-01/OCED_H2Hubs.pdf

- At sikre en opskalering af PtX-produktionen, der matcher en voksende efterspørgsel, som en vej til at opnå storskalaproduktion og kommercielt levedygtige økosystemer.

Sagt på en anden måde handler det om både at se PtX i en sammenhæng, som inkluderer produktion, forarbejdning, levering, lagring og forbrug, og om at tilskynde til nye teknologiske løsninger i hele værdikæden. Tyske studier om implementering af PtX har adresseret dette perspektiv (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2023) og (Florian Ausfelder, 2024).

Ved at se os om i verden kan vi rette opmærksomheden mod forskellige internationale tiltag, som næste skridt i udviklingen af styrker inden for den danske PtX-industri. Her vil vi først og fremmest pege på tiltag, som kan danne grundlag for fortsat viden- og kompetenceopbygning, så Danmark fortsat kan være et førende land inden for udvikling af PtX-teknologi og dermed i endnu højere grad blive en global leverandør af PtX-teknologi.

Grøn strøm er en kritisk forudsætning for PtX, som fremover også vil kræve betydelig opmærksomhed. Selvom det er nok så vigtigt, er det ikke sigtet med Teknologisk Udsyn at pege på tiltag til at overvinde denne udfordring.

Der kan være flere måder, hvorpå man kan tage skridt til udvikling og fremme af danske styrker inden for PtX. Her vil vi tage udgangspunkt i de to tidligere omtalte udviklingsveje, nemlig den FoU-orienterede udviklingsvej og den mere industrielle eller markedsorienterede udviklingsvej, og give eksempler på mulige næste skridt:

1. Næste skridt: Udviklingen af PtX-markedet med inspiration fra Regional Clean Hydrogen Hubs Program (H2Hubs, USA), men også fra Norge og Tyskland

Ved at udvikle et dansk marked for grøn brint og grønne andre PtX-produkter kan

Danmark opbygge viden og erfaring, som vil kunne gavne teknologiudviklingen inden for PtX.

- Et sådant marked kunne bidrage til et klimamæssigt neutralt dansk landbrug ved at producere grøn ammoniak og på andre måder understøtte den grønne omstilling i landbruget, fx ved at levere brændstof til tunge maskiner (Simon Araya, Cui, Li, Liso, & Sahlin, 2022).
- Norge er i gang med at udvikle et produktions- og distributionsnet for brændsler til skibsfart, "ammonia fuel bunkering network". Ved at søge samarbejde med Norge – eller med de nordiske lande eller landene i Nordeuropa – kunne Danmark være med til at lægge grundstenene til en udbredt fossilfri skibsfart i Nordeuropa. (Green Power Denmark, 2023).

2. Næste skridt: Styrke strategisk innovation og industrialisering

PtX-teknologien er grundlæggende kendt, men ikke fuldt industrialiseret. Udover generelle investeringer i forskning og innovation kunne initiativer inden for teknologiudvikling være at støtte strategiske markedsførende mål, såsom dem, der er nævnt ovenfor. Dette kræver en fokuseret indsats, som samtidig omfatter både teknologiudvikling – måske med fokus på SOEC, hvor Danmark står relativt stærkt – samt udvikling af relevant produktions- og infrastrukturteknologi, herunder test og udvikling.

3. Næste skridt: Fremme internationaliseringen af dansk PtX-industri

Danske PtX-virksomheder er til stede på en række udenlandske markeder – ikke bare nærmarkeder i Europa men også fx i USA – som leverandører af teknologi og service. Parallelt med udviklingen af et dansk marked – og et eksportmarked for PtX-produkter (e-metan, metanol og ammoniak), som er lettere at transportere – bør dansk baseret teknologiudvikling og innovation

inden for PtX udnyttes til yderligere at fremme dansk teknologiekseport.

Det Teknologiske Udsyn har identificeret danske styrker inden for PtX. En klar observation er også, at de danske styrker er udfordret, uden at det har været målet at opstille en

udviklingsvej for PtX. Ved at pege på mulige "næste skridt" er det blot intentionen, at Teknologisk Udsyn for PtX kan være afsæt for en strategisk dialog om, hvad Danmark kan gøre inden for PtX med henblik på at skabe et teknologisk og erhvervsmæssigt udviklingsområde – og dermed et vækstområde for Danmark.



Bibliografi

Berlingske Business. (24. oktober 2024). Han hjælper danske virksomheder i Texas .
 Berlingske Business. (28. September 28. september 2024). Brintkastellet, der blev sprængt: Politikernes grønne eventyr vakler.
 Biermann, J., & Boumrifak, C. (2022). Kopernikus Project P2X Results of the second funding phase. Frankfurt am Main: DECHEMA.
 COWI. (2023). Analyse af forsknings- og teknologiområder. Danmarks Erhvervsfremmebestyrelse.
 Danish Offshore industry. (2023). greenpowerdenmark. Hentet fra tyskerne-har-nu-brintstrategi-danmark-boer-foelge-trop: www.greenpowerdenmark.dk/nyheder/tyskerne-har-nu-brintstrategi-danmark-boer-foelge-trop

[boer-foelge-trop](http://www.boer-foelge-trop)
 Deutschland.de. (December 2024). Germanys-industry-the-most-important-facts-and-figures. Hentet fra deutschland.de: www.deutschland.de/en/topic/business/germanys-industry-the-most-important-facts-and-figures
 Draghi, M. (2024a). The future of European competitiveness. Part A | A competitiveness strategy for Europe.
 Draghi, M. (2024b). The future of European competitiveness. Part B | In-depth analysis and recommendations.
 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020). The National Hydrogen Strategy.
 Florian Ausfelder, M. R. (2024). European

Hydrogen Infrastructure Planning.
TransHyDE Project System Analysis.
Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
ISE. (2023). Power-to-X country analysis.
Site-specific, comparative analysis for
suitable Power-to-X pathways and products
in developing and emerging countries.
Green Power Denmark. (2023). Grøn skibsfart i
Nord- og Østersøen.
Hansen, F. M. (11. Oktober 2024). 14 ud af 17
brintfabrikker er forsnikket eller droppet.
Ingeniøren, s. 4-5.
Innovation Centre Denmark, Munich. (2021).
Industry on Campus in Southern Germany.
Types and characteristics. ICDK Outlook.
Innovation Centre Denmark, Munich og
Teknologisk Institut. (2022). Test and
Demonstration Facilities in Southern
Germany.
International Energy Agency. (2024). Global EV
Outlook 2024.
International Energy Agency. (2024). Global
Hydrogen Review.
IRIS Group. (2019). Danske styrker inden
for forskning, teknologi og uddannelse
– og deres betydning for vækst og
erhvervsudvikling. Erhvervstyrelsen.
Jennifer Wong Leung, S. R. (2024). ASPI's
two-decade Critical Technology Tracker.
Australian Strategic Policy Institute.
Kennedy, S. (1. juni 2015). Made in China 2025.
Hentet fra www.csis.org/analysis/made-china-2025
Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet .
(2021). Regeringens strategi for Power-
to-X.
Menon Economics. (2022a). Verdien av den
norske hydrogenneringen. Status og
fremtidsutsikter.
Menon Economics. (2022b). Kartlegging av
behovet for testfaciliteter for hydrogen og
ammoniakk.
Norwegian Hydrogen Forum. (2024). The
Norwegian Hydrogen Guide.
OECD. (2024). The geography of green
innovation hubs in OECD regions .

Rambøll. (2021). Export potential. CCUS & PTX
technologies. Danish Energy Agency. Danish
Energy Agency.
Rambøll. (2021). Power-to-X muligheder og
erhvervspotentialer. Dansk Energi.
Simon Araya, S., Cui, X., Li, N., Liso, V., &
Sahlin, S. L. (2022). Power-to-X. Technology
overview, possibilities and challenges.
Aalborg Universitet.
Teknologisk Institut. (2023). Kritisk teknologi
til fremtidens resiliente samfund. ATV.
Teknologisk Institut. (2024). Teknologiudvikling
blandt leverandører af PtX-teknologi og
PtX-anlæg.
Teknologisk Institut. (2012). Regionale
styrkepositioner. En ny regional indsats. LO –
Landsorganisationen i Danmark.
Teknologisk Institut. (2020). Verdens ledende
Science & Engineering-regioner. ATV.
Teknologisk Institut. (2022). Power-to-X –
et forretningsområde i fremvækst. En
erhvervsøkonomisk analyse.
Teknologisk Institut. (2023). Power-to-X
– Et vækstområde møder udfordringer
Erhvervsøkonomisk analyse 2.
Teknologisk Institut. (September 2024).
Workshop om danske PtX-styrker.
The Federal Government. (2024). Import
Strategy for hydrogen and hydrogen
derivatives. Berlin: Federal Ministry for
Economic Affairs and Climate Action
(BMWK).
The Federal Government, Germany. (2023).
National Hydrogen Strategy . Berlin.
U.S. Department of Energy. (2023). U.S.
National Clean Hydrogen Strategy and
Roadmap.
Waltman, L. e. (2012). The Leiden ranking
2011/2012: Data collection, indicators, and
interpretation. Journal of the American
Society for Information Science and
Technology.
Wulf, C. Z. (September 2020). Review of Power-
to-X Demonstration Projects in Europe.
Frontiers in Energy Research. 8:191.



” Danske teknologivirksomheder er førende internationalt, men potentialet skal realiseres gennem målrettede investeringer i forskning og udvikling.

Teknologisk Institut rådgiver om Power-to-X

Teknologisk Institut er din partner gennem hele processen – fra teknologi- og materialevalg til procesoptimering og fuldskalaproduktion.

Vi står klar til at hjælpe din virksomhed med at udvikle, teste og implementere løsninger, der minimerer risici og maksimerer potentialet.

Fra prototype til fuld skala

Overgangen fra pilot- til industriel skala kan være kompleks. Vi tilbyder avancerede testfaciliteter og rådgivning, der gør jeres teknologier markedsklar. Vi skaber desuden samarbejde mellem danske virksomheder og internationale eksperter og hjælper med at finde globale partnere.

Udvikling af Power-to-X-anlæg

Vi rådgiver i komplekse processer som elektrolyse, vandbehandling og opsamling af overskudsvarme, og vi hjælper med risiko-

afdækning, dimensionering og godkendelse af anlæg.

Grønne brændstoffer til transport og industri

Vi hjælper med at udvikle og validere teknologier til grønne brændstoffer som metanol og ammoniak, der er målrettet tung transport og industri, så I kan levere løsninger, der gør en forskel.

Materialer, test og certificering

Vi optimerer valg af materialer og rådgiver om processer med fokus på bæredygtighed. Vores laboratorier tester og validerer teknologier, komponenter og produkter, så de lever op til alle krav og standarder som CE-mærkning.



Konkrete services

I vores laboratorier og faciliteter kan I blandt andet få hjælp til:

- 3D-print af komponenter
- Højteknologiske overfladebelægninger og coatings
- Elektrolyse og katalyse
- Gas- og reaktorteknologi
- Brændselsceller og hybridsystemer
- Vandteknologi
- Test af fleksible og intelligente energikomponenter
- Certificering og inspektion



John Lindegård Kjær

Markedschef

jlk@teknologisk.dk

+45 72 20 27 22

Teknologisk Udsyn giver en oversigt over den seneste udvikling på et teknologifelt med betydning for Danmarks fremtid. Vi giver et indblik i aktørlandskaber og fremtidige tendenser, Danmarks aktuelle position samt anbefalinger til samfundets implementering.



teknologisk.dk