

Power-to-X med grøn omtanke: Balance mellem acceleration og luftkasterler

Hvordan bør Danmark prioritere, afgrænse, udvikle og skalere Power-to-X i omstillingen til bæredygtig energi, mobilitet og industri?

 **POLICY ANBEFALINGER**

Danmark bør fokusere på en omkostnings- og energieffektiv omstilling væk fra fossile brændsler og biomasse, og Power-to-X er på udvalgte områder et nødvendigt element. Men PtX skal anvendes med omtanke. Det kræver et skarpt fokus på især otte punkter.

- **Tilstrækkelighed:** Power-to-X (PtX) bør begrænses til langdistance sø- og luftfart, til fremstilling af kemikalier, plast og gødning, der kræver brint, samt til de industriprocesser, som ikke kan elektrificeres. PtX bør holdes ude af vejtransport og varmesektoren.
- **VE-acceleration:** Udbygningen af grøn strøm skal accelereres maksimalt, både ift. kapacitet og hastighed, og det er afgørende, at udbygningen med sol og vind sker væsentlig hurtigere end udbygningen med PtX.
- **Prioritering:** Behovet for kulstof i fremtidens energi- og resourcesystem skal minimeres mest muligt, bl.a. ved at mindske behovet for CCS gennem hastige og dybe emissionsreduktioner. Samtidig bør det sikres, at der er biogen CO₂ tilgængelig til kulstofholdige brændstoffer i de sektorer, som ikke har tilgængelige alternativer. Sektorer med alternativer til kulstofbaserede brændstoffer bør fokusere på elektrificering og brændstoffer uden kulstof såsom brint og ammoniak.
- **Energieffektivitet:** Der etableres incitamentet for højst mulig energieffektivitet i produktionen og forbruget af PtX-brændstoffer – enhver reduktion i behovet for PtX-brændstoffer (og mængden af grøn strøm) vil alt andet lige mindske udfordringen. Dette gælder selvsagt også ved reduktion af slutforbruget, fx transportarbejdet.
- **Fremsyn:** Der er stor usikkerhed ift. hvor store mængder brint, der er behov for i fremtiden. Fremtiden brintbehov bør undersøges grundigere, før infrastruktur og produktionskapacitet skaleres til et niveau, som risikerer at føre til overkapacitet og PtX lock-in.
- **Undgå lækage:** Brint udleder ikke drivhusgasser ved afbrænding, men ved lækage har brint en betydelig indirekte opvarmende effekt i atmosfæren. Der bør derfor stilles krav om mindst mulig eller nul-lækage langs hele værdikæden.
- **Planlægning:** Placeringen af PtX-anlæg er en vigtig planlægningsopgave, som bør håndteres centralt, så der kan tages højde for adgang til VE, fjernvarmenet, infrastruktur til brint, biogent CO₂, og tilstrækkelige mængder vand.
- **Markedsfokus:** Udvikling og skalering af PtX-produktion og -infrastruktur er omkostningstung, og det bør overlades til markedets aktører at påtage sig de tilknyttede risici. Overilet statslig støtte kan resultere i en overdimensioneret infrastruktur, eller at Danmark ender med at betale for CO₂-reduktioner i rige nabolande som Tyskland og Holland. Der kan opnås større umiddelbar klimaeffekt, hvis de offentlige midler gives til at fremme energieffektiviseringer, varmepumper og hurtigere udbygning af VE.

Sammenfatning

Der er for tiden et meget stort politisk og økonomisk pres i Danmark for at satse på Power-to-X, og internationalt er der en del hype omkring mulighederne for at skabe en ny brintøkonomi. I dette notat vurderer Rådet for Grøn Omstilling, hvad Power-to-X kan bruges til, og hvad det ikke bør bruges til. I hvilket omfang vil det energimæssigt og økonomisk være fornuftigt at lave grøn brintproduktion fremstillet med vedvarende energikilder, og hvad bør man undgå?

Rent energiøkonomisk er den mest effektive løsning at elektrificere industrien, transporten og varmesektoren, da det kan spare op imod [40 pct.](#) af vores samlede energiforbrug.¹ Men på nogle områder er Power-to-X dog et ineffektivt og "nødvendigt onde": Skal vi sikre klimaneutralitet og dekarbonisere vores økonomi, vil der også i et vist omfang blive brug for fremstilling af e-brændstoffer til langdistance sø- og luftfart, og brug for brint som råvare til bl.a. fremstilling af plastik, kemikalier og kunstgødning. Det kan også være nødvendigt i dele af den tunge industri, der ellers kan vise sig svær at elektrificere.

Man kan kort sagt anskue PtX som en slags "energi-champagne", som kun bør benyttes, hvor det ikke er muligt at elektrificere.

De samfundsøkonomiske rammer omkring udvikling og opskalering af PtX vil i høj grad blive påvirket af industri- og arbejdsmarkedspolitikken, international konkurrence, og om der er aktører med høj betalings- og investeringsvillighed. I luft- og søfartsbrancherne ser der f.eks. ud til at være en vilje til at betale en højere pris per ton CO₂-reduktion end i andre sektorer.

Danmark har takket være sine enorme mængder af billig havvind i Nordsøen, vores energisystem med høj grad af vedvarende energi i strømforsyningen og udbredt brug af fjernvarme til opvarmning et godt udgangspunkt for at optimere samspelet mellem Power-to-X og udviklingen af et energisystem, der i stigende grad er baseret på svingende energiproduktion fra vedvarende energi. Hertil kan det fremhæves, at både luft- og søfartsbrancherne er langt bagude ift. andre sektorer, og der er her behov for så hurtigt som muligt at udvikle grønne PtX-brændstoffer.

PtX er dog begrænset af en række faktorer: I dag fremstilles der under 1 GW grøn brint på globalt plan, og mange elektrolysefabrikkerne er kun mindre prototyper, hvorfor det kan blive svært at skalere produktionen op, så meget som industrien forestiller sig. Det er også afgørende at sikre tilstrækkelig med grøn strøm til de kommende PtX-

fabrikker, så man ikke ender med at fremstille brint med fossil energi med et stort klimaaftryk. Private investorer og konsortier har allerede lagt ambitiøse planer for nye PtX-fabrikker, men udbygningen med land- og havvind og solceller i Danmark går stadig alt for langsomt. Det er ikke blevet bedre af beslutningen om at stoppe en række af de offshore-vindmølleparker, som ellers lå klar i åben-dør ordningen. På længere sigt kan der også komme en betydelig udfordring med at skaffe tilstrækkelig kulstof til fremstilling af de nye e-brændstoffer, hvilket man er nødt til at adressere i tide.

PtX kan iflg. Energistyrelsen føre til en voldsom stigning i efterspørgslen efter grøn strøm, og det er derfor vigtigt, at der politisk lægges en mere samlet energiplan, der kan adressere de sammensatte udfordringer i tide. Stærke erhvervslobbygrupper og investorer har længe presset hårdt på for at skrue hurtigt op for ambitionsniveauet. Men det er vigtigt at lave en kritisk og uafhængig analyse af de forskellige scenarier for fremtidens efterspørgsel på brint og PtX, med fokus på at nå de størst mulige klimaeffekter for færrest mulige penge. Overdimensioneres en ny brintinfrastruktur med store brintrør til Tyskland og andre europæiske lande kan det skabe et investeringsmæssigt "lock-in", der fjerner penge fra andre mulige investeringer, som har en større klimagevinst.

Fremtidens efterspørgsel efter grøn brint afhænger både af teknologiuudviklingen (herunder elektriske alternativer), og hvordan forbrugsmønstret udvikler sig. Det er ikke en selvfølge, at omstilling til PtX skal betyde *business as usual* i f.eks. antallet af forretningsrejser og forbruget af gødning. Kan man f.eks. få folk til at ændre adfærd og flyve mindre, vil det mindske behovet for e-kerosen. Og kan man gennem reguleringer få landbruget til at sænke forbruget af kunstgødning - hvor der i dag også er alvorlige miljøproblemer med alt for stor udvaskning af næringsstoffer - vil det ændre efterspørgslen efter den nye generation af e-ammoniak fremstillet med grøn brint.

PtX produkter kan mindske luftforureningen fra afbrændingen af fossile brændsler, og vil være bedre for klimaet end den fossile *business as usual*, men de skal også doseres rigtigt. Man bør ikke spilde store mængder energi på PtX, hvor det er både bedre og billigere at elektrificere. Det gælder f.eks. vejtransporten eller varmesektoren. Jo mindre PtX vi kan nøjes med, jo færre vindmøller, kabler og råstoffer kan vi klare os med i fremtiden. Spørgsmålet om tilstrækkelighed bør ikke udelades i debatten om PtX.

¹ Rådet for Grøn Omstilling, Handleplan for energieffektivisering, juni 2023.

I stedet for at blive grebet af hype og overoptimistiske fremtidsprognoser, bør Danmark fokusere på realisme og energioekonomisk ansvarlighed.

PtX kræver f.eks. enorme mængder af meget rent vand, så adgangen til vand bliver også en kritisk faktor, der skal med i energiplanlægningen². Der er stadig betydelig usikkerhed om, hvor store mængder brint, der egentlig vil være behov for i fremtidens energisystem. Selv i et samfundsøkonomisk *business as usual* scenarie kan det vise sig, at behovet for grøn brint i 2030 i Europa er op til 5 gange mindre, end Europa-Kommissionen ellers lægger op til. Inden man kaster sig ud i en voldsom opskalering med grøn brint i Danmark og EU, er der behov for flere grundige analyser af fremtidens energibehov, hvor der tages højde for øget energieffektivisering og elektrificering i bl.a. vejtransporten og industrien.

Der er desuden stor usikkerhed om lækage-risikoen for brint. Brint er et flygtigt molekyle som er svært at opbevare. Brint har en indirekte opvarmende effekt, og det vil være afgørende at sikre, at den kommende udbygning af hele værdikæden for brint sikres mod lækage.

² Et kg H₂ kræver 8,93 kg ultrarent vand.

Hvorfor Power-to-X?

Danmark skal omstille sig til klimaneutralitet senest i 2040 og det er dermed nødvendigt at udfase brugen af kul, olie, gas og biomasse hurtigst muligt. Det kræver i første række, at der satses meget mere offensivt på energieffektiviseringer, og at der laves en lynhurtig udbygning med ren vedvarende energi som solceller, vindenergi og geotermi. De fossile brændsler står stadig bag 53 pct. af Danmarks bruttoenergiforbrug, og skal vi skabe et klimaneutralt eller ligefrem klimapositivt samfund, kan det kun gå for langsomt med at udfase og stoppe brugen af fossile brændsler. Der er dog stadig store uløste udfordringer med at udfase olie i transportsektoren samt i dele af den tunge industri, fordi det går alt for langsomt med elektrificeringen i Danmark. Hertil kommer brugen af kulbrinter i kemikalier, plastik og andre kulstofholdige produkter. Det er i disse svært-dekarboniserbare sektorer, at syntetiske olieprodukter produceret med grøn strøm (e-fuels) via Power-to-X (PtX) kan bruges til at udfase brugen af fossile brændstoffer, fossil kunstgødning og fossil brint i en række råvarer.

I dette notat skitseres en række perspektiver for udvikling og bæredygtig opskalering af Power-to-X i Danmark.

Brintens begrænsninger

Der er politisk stor opmærksomhed og en betydelig mængde *hype* om brint og Power-to-X. Denne opmærksomhed er i en vis grad berettiget i og med PtX kan få en vigtig rolle i den grønne omstilling af fly, skibe og i dekarboniseringen af dele af den tunge industri. Men samtidig er der grund til at holde tungen lige i munden.

Elektrolyseprocessen, hvor vedvarende energi konverteres til grøn brint, som bagefter bruges til fremstilling af e-brændstoffer er grundlæggende en dyr og ineffektiv proces fordi der er meget store energitab undervejs. For at sikre en omkostnings- og klimaeffektiv omstilling, er det derfor helt afgørende at PtX begrænses til de sektorer, hvor der ikke findes andre fornuftige løsninger. Hvis man puster PtX-produktionen for kraftigt op, kan det føre til et enormt spild af kostbar vedvarende energi. Brint og PtX bør holdes helt ude af biler, lastbiler og opvarmning af boliger, hvor der allerede findes mere effektive alternativer. Fremskridt i den direkte elektrificering af tung industri gør desuden, at man bør være varsom med at introducere brint, da investeringer i infrastruktur og produktionsapparat kan fastlåse industrier i indirekte

elektrificering og dermed forsinke mere effektiv direkte elektrificering.

Af den tidligere regerings *Strategi for Power-to-X*³ fremgår det, at Danmark i 2030 har en 4-6 GW PtX-kapacitet, så man via vedvarende energi kan fremstille grøn brint til e-brændstoffer til søfart, luftfart, dele af den tunge industri samt til fremstilling af kemikalier, plastik mv. Det er en meget ambitiøs plan, men private investorer er i gang med at udvikle PtX-projekter, der har omkring dobbelt så meget kapacitet. Danmark er ikke det eneste land, hvor der tales om en kraftig opskalering med grøn brint, og Europa-Kommissionen har sat et mål om, at der i 2030 skal fremstilles 10 mio. tons grøn brint i EU, mens der importeres yderligere 10 mio. tons. Men globalt fremstilles der i dag under 1GW eller godt 0,1 mio. tons grøn brint, og mange af projekterne er mindre anlæg og prototyper, som endnu mangler at blive opskaleret.

99 pct. af verdens brintproduktion laves i dag med fossile brændsler, og deres samlede udledning af drivhusgasser svarer rundt regnet til udledningen fra verdens luftfart. Derfor er det også vigtigt at få dekarboniseret verdens brintproduktion. På globalt plan fremstilles op imod 120 mio. tons brint eller brint i forbindelse med andre gasser.⁴ 42 pct. af den bruges i raffinaderierne til at fjerne svovl fra benzin- og diesel (hvilket begrænser syreregn), 37 pct. bruges til at lave kunstgødning og resten bruges til fremstilling af metanol, kemikalier, plastik og i industrielle processer.⁵

I omstillingen bør man ikke overse, at brint i sig selv også har en betydelig opvarmende effekt ved lækage til atmosfæren, da det fungerer som en indirekte drivhusgas. Det sker, når brinten stiger op i atmosfæren og troposfæren og går i forbindelse med de frie radikaler og dermed forlænger andre drivhusgassers levetid. Der er fortsat videnskabelig uenighed om niveauet af opvarmning og regnemetoder, fordi brint har en meget stor umiddelbar effekt, men samtidig har relativ kort levetid i atmosfæren. Et studie publiceret i *Nature* estimerer opvarmningen til mere end 11 gange så skadelig for klimaet som CO₂ set over 100 år⁶ Andre studier har vist, at brint over 20 år kan være mellem 19-38 gange mere skadelig end CO₂.⁷ Hvis overgangen fra fossile brændsler til brint-baseret økonomi ikke skal have en u hensigtsmæssig slagside, bør der derfor stilles krav om minimal lækage og grundig kontrol langs hele værdikæden⁸. Dette udfordres dog af, at de nuværende

3

<https://kefm.dk/Media/637751860733099677/Regeringens%20strategi%20fo%20Power-to-X.pdf>

⁴ Kakoulaki, G et.al., Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables, Energy Conversion and Management, vol. 228, 15. Jan. 2021

⁵ Tavydas, D, JRC technical report, The role of hydrogen in energy decarbonization scenarios, 2022.

⁶ Sand et. al., A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen, 2023.

⁷ Ocko, I og Hamburg, S, Climate consequences of hydrogen leakage, Environmental Defence Fund, 18. Feb. 2022.

⁸ <https://energiwatch.dk/Energinyt/Cleantech/article13677844.ece>

sensorsystemer til at spore lækage ikke er i stand til at opfange mindre læk, og det derfor vil være nødvendigt at udvikle nyt udstyr og nye sikkerhedsprocedurer for at forhindre brint-lækager.⁹

Brint er desuden brandbart og eksplosivt og der skal tages sikkerhedsmæssige hensyn i både produktion, distribution og anvendelse. Det er afgørende, at der fra myndighedernes side stilles skrappe sikkerhedskrav. Sikkerhedsrisici og lækage kan minimeres ved at begrænse brugen af brint til storskala-faciliteter såsom produktion af e-ammoniak og e-kerosen. Bruges brint i sektorer med mange punktkilder såsom vejtransporten eller opvarmning af boliger, stiger risikoen for lækage.

Power-to-X i transporten

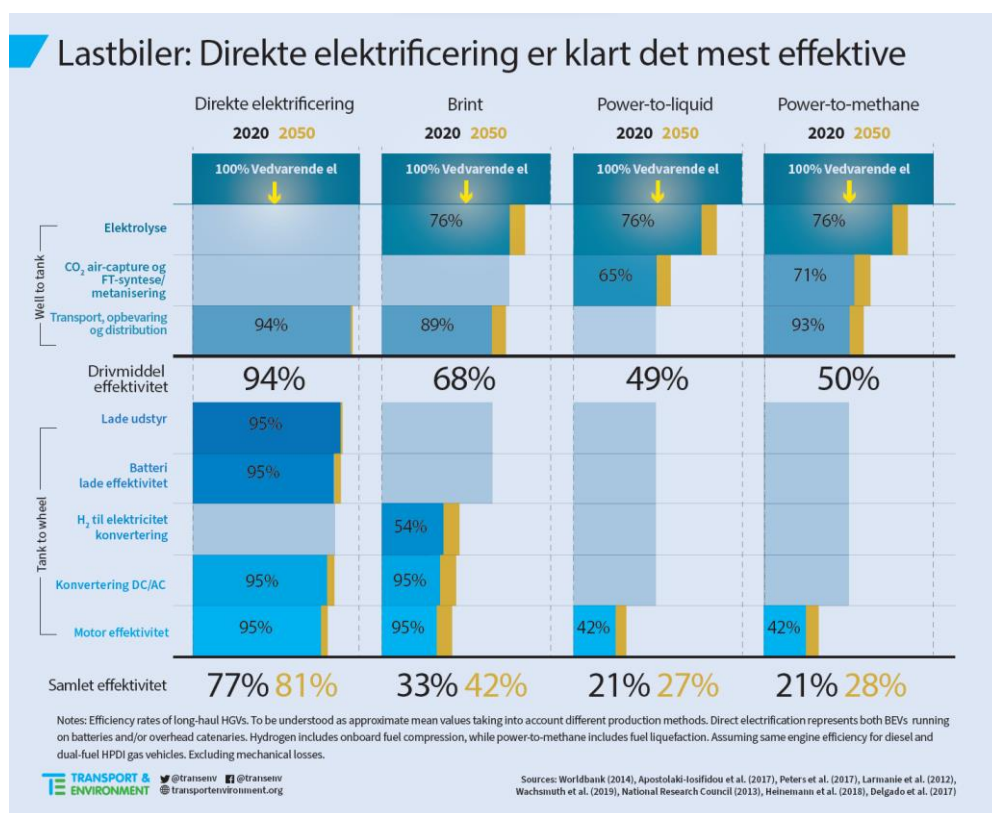
Vejtransporten udgør langt hovedparten af transportsektorens klimabelastning, og her er det mest effektive og fordelagtige - både ud fra et klima- og økonomiperspektiv - at elektrificere direkte via elbiler og el-lastbiler jf. figur 1. Dansk og europæisk lovgivning understøtter da også i høj grad omstillingen fra forbrændingsmotorer til batterielektriske køretøjer.

For langdistance sø- og luftfart, er det derimod ikke muligt at omstille til batterielektriske fartøjer, da batterier ganske enkelt er for store og tunge. Problemet kan illustreres ved, at Mærsk's fragtskibe udelukkende skulle fylde containerne med batterier i stedet for varer, hvis de skulle sejle batterielektrisk. Ofte vil det heller ikke være muligt at bruge brint direkte, da det fylder for meget, men i stedet kan man opgradere brinten til andre brændstoffer såsom ammoniak til søfarten og e-kerosen til luftfarten.

Biobrændstoffer spiller også en rolle i omstilling af sø- og luftfart, men mængden af reelt bæredygtige biobrændstoffer er stærkt

begrænset, og vil langt fra kunne opfylde behovet i hverken sø- eller luftfarten. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping har påvist vil der være betydelig konkurrence om en begrænset mængde bæredygtige bioressourcer¹⁰ - globalt forventes der at være omkring 50-100 EJ bæredygtig biomasse til rådighed i 2050, mens den samlede efterspørgsel fra skibe, fly, plastik, cement mv. estimeres til 190-430 EJ. Dermed er Power-to-X en teknologi, som kan skaleres til at gennemføre en omstilling til 100 % grøn sø- og luftfart.

Både for luft- og søfarten er der tale om sektorer, som i det store billede endnu ikke har påbegyndt en reel grøn omstilling, og her er det presserende at gøre noget, hvis den globale klimaafteale fra Paris skal overholdes. Især søfartens omstilling er belastet af et massivt fossilt lock in. Hvert nyt skib uden kapacitet til at sejle på grønne brændstoffer vil udlede drivhusgasser i årtier og uden en massiv og hurtig opskalering af PtX vil rederierne forsat bestille nye fossil-drevne skibe. Men selvom bestillingen af grønne skibe i dag er marginal, er udfordringen fortsat på brændstofsiden, eksempelvis har Mærsk Centeret for Zero Carbon Shipping påpeget, at der er bestilt langt flere skibe, som kan sejle på e-metanol, end den forventede produktion kan forsyne. Inden for det næste årti kan



Figur 1: Effektivitet af alternative el-baserede drivmidler til lastbiler.
Kilde: Transport & Environment.

⁹ <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/hydrogen-leakage-potential-risk-hydrogen-economy/>

¹⁰ <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/maritime-decarbonization-strategy/>

søfarten komme til at mangle op mod 20 millioner tons grønne brændstoffer¹¹.

Sat på spidsen kan det påpeges, at hvis Danmark lykkes med at fremskynde omstillingen af den globale luft- og søfart med en enkelt dag, vil det ifølge RGO's egne beregninger spare atmosfæren for 5,5 Mt CO₂ – én uges fremskyndet omstilling vil give en CO₂-besparelse på lidt under Danmarks årlige udledninger.

Power-to-X i energisektoren og industrien

I energisektoren forventes det, at en stor del af kraftvarmeverkerne gradvist udfases frem mod 2040, og Energistyrelsen forventer en halvering af deres kapacitet¹². Denne reduktion af regulerbar produktionskapacitet er selvsagt en udfordring, jo større andel VE spiller i strømforsyningen. Her kan brint spille en rolle som et ekstra energilager.

Ifølge Klimarådet vil man kunne opretholde forsyningsikkerheden med et dansk og europæisk el-system, der i høj grad er baseret på ren vedvarende energi med sol og vind, hvis den suppleres af en mindre regulerbar kapacitet via gasturbiner. Gasturbinerne vil kunne køre på biogas eller brint, hvor deres forbrug forventes at være begrænset, da de set over en årrække kun forventes af være i drift i få timer for at sikre strøm under vejr- og transmissionschok.¹³

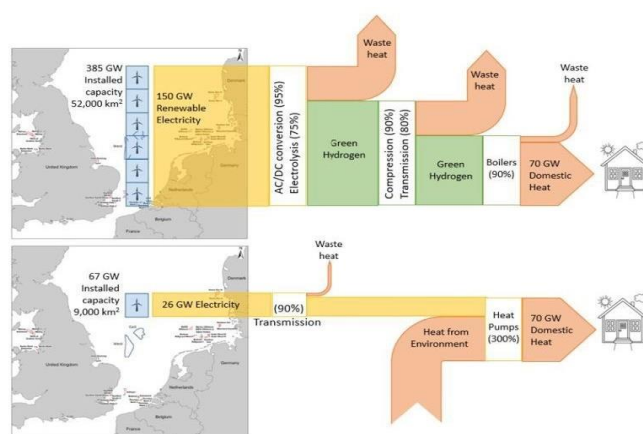
Brint bør pga. det massive energitab ikke spille nogen direkte rolle i varmeforsyningen, da eksempelvis varmepumper er langt mere effektive. Det illustreres ved figur 2, som viser, at der skal bruges næsten 6 gange så meget vedvarende energi til at producere varme til boliger i England, hvis man vælger brint frem for varmepumper. Der vil dog være en betydelig mængde overskudsvarme fra produktionen af grønne brændstoffer, som vil indgå i fjernvarmeforsyningen. Ifølge COWI kan op imod 20% af det danske fjernvarmebehov blive dækket af overskudsvarme fra PtX-produktion, hvilket desuden vil reducere den samlede produktionspris på brint¹⁴.

Sektorkoblingen mellem brintproduktion og fjernvarme besværliggøres af afstanden mellem produktionen af vedvarende energi ved kystnære områder langs Nordsøen samt ved Lolland og Falster og fjernvarmenettene ved de store byer. Der er derfor en vigtig planlægningsopgave, som bør håndteres centralt, da de enkelte selskaber og kommuner ikke har mulighed for at kunne finde de samfundsmæssigt optimale placeringer for PtX-

produktion, når der tages højde for adgang til VE, fjernvarmenet, infrastruktur til brint, biogent CO₂, og tilstrækkelige mængder vand.

For industrien fremføres det ofte, at det ikke er muligt at opnå højtemperatursvarme uden afbrænding af fossile brændsler, biogas eller brint. Ændring af processer og teknologiske nybrud gør dog, at det selv for temperaturer over 1.500 °C er muligt at elektrificere direkte, så længe der er en stabil elforsyning.¹⁵

Figur 2: Sammenligning af energibehovet ved opvarmning via hhv. brint eller varmepumper i England.



Kilde: ECOS, "Burning question: why hydrogen boilers are not the answer"

Årsagerne til at fravælge direkte elektrificering er ofte sammensatte, da timing, afskrivning af produktionsudstyr, viden og regulering kan skubbe en virksomhed imod fortsat fossilt forbrug eller indirekte elektrificering i den næste investeringscyklus. Over de kommende år er der for langt de fleste - hvis ikke stort set alle - industrivirksomheder i Danmark gode muligheder for at elektrificere direkte og dermed reducere behovet for brint. Rockwool har allerede lavet en fuldskala elektrisk fabrik i Moss i Norge til at fremstille stenuld. På samme måde kan en elektrificering af fx den tyske stålindustri reducere eksportpotentialet for brint betydeligt.

Hvor stor kapacitet får vi brug for?

Efter invasionen af Ukraine har EU opjusteret målsætningerne for europæisk forbrug og produktion af grøn brint og PtX. Med RePowerEU planen har man fra Bruxelles således sat mål om at EU i 2030 skal producere 10 millioner tons grøn brint (svarende til 330 TWh) i 2030

¹¹ <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/maritime-decarbonization-strategy/>

¹² Energistyrelsen, Analyseforudsætninger til Energinet 2022, 2023.

¹³ Klimarådet, Sikker elforsyning med sol og vind, 2023

¹⁴ <https://www.cowi.dk/om-cowi/nyheder-og-presse/ny-rapport-fjernvarme-kan-give-danmark-power-to-x-forspring>

¹⁵ <https://klimamonitor.dk/nyheder/art7936233/Elektrificering-er-mulig-men-vi-har-fravalgt-det-i-Danmark>

og hertil importere yderligere 10 million tons fra tredjelande. Flere medlemsstater har også sat mål for elektrolysekapacitet i 2030, og der foregår en intern konkurrence medlemsstaterne imellem om at "komme først" med at opskalere PtX-kapaciteten og vinde markedsandele og arbejdspladser. Danmark sigter som nævnt efter en elektrolysekapacitet på 4-6 GW i 2030, eller ca. 0,5-0,7 mio. tons brint, og dermed er vores PtX-ambitioner på linje med betydeligt større lande som Storbritannien, Italien (der begge har mål om 5 GW i 2030) og Frankrig (6,5 GW i 2030).

Det er således vigtigt at holde sig for øje, at udviklingen af PtX-produktion ikke kan adskilles fra økonomiske samt energi- og industripolitiske prioriteter. Fx har CIP Fonden advokeret for, at Danmark bør blive "storeksportør" af grøn brint for at nedbringe vores nabolandes CO₂-udledninger. CIP Fonden estimerer Danmarks samlede PtX-eksportpotentiale ved fuld og rettidig udbygning af nuværende, kendte og screenede VE-arealer til omkring 100 mia. kr. årligt.¹⁶

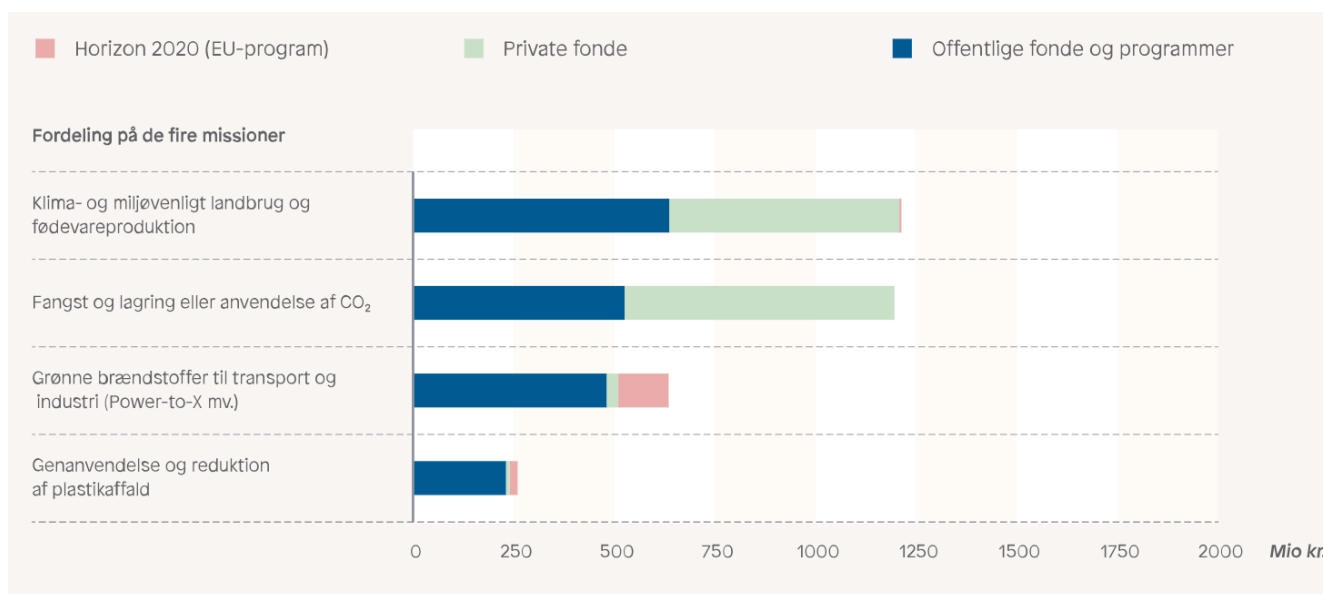
Der er dog som nævnt store usikkerheder i fremskrivninger af behovet for grøn brint, da behovet i bl.a. industrien kan være overvurderede pga. bedre muligheder for direkte elektrificering, mens der vil være stærkt faldende behov for brint til afsøvling af olie og benzin. Ifølge den tyske tænketank, Agora, kan vi reducere vores totale brintbehov i EU til 4 mio. ton, altså 20% af det nuværende mål i RePowerEU, med øget fokus på energieffektivisering og elektrificering.¹⁷ Ud over den store usikkerhed selv i et

BAU-scenarie, kan brint ikke blive en undskyldning for blot at fortsætte som hidtil. Den mest effektive tilgang til at begrænse drivhusgasudledninger fra eksempelvis transporten er at begrænse transportmængden.

En kritisk faktor i forhold til at lave prognoser for fremtidens marked for grøn brint er også, om den økonomiske vækst vil fortsætte, eller om klima- og biodiversitetskrisen vil føre til et politisk nybrud, hvor flere vil efterlyse alternativer til det vækstbaserede samfund. Ved Europa-Parlamentets "Beyond Growth"-konference 15.-17. maj, 2023 var der f.eks. markante stemmer, der slog til lyd for "sufficiency" og livskvalitet som alternativer til det gamle mainstreamfokus på vækst i bruttonationalproduktet.

Mere viden og forskning

Der er gjort en del fremskridt i forskningen inden for PtX, og den har også fået tilført ekstra midler de seneste 5 år. Alene i Danmark investeres der via Inno-missionerne 600+ mio. kr. i forskning af grønne brændstoffer (figur 3), og der tales i følgegrupperne om store forbedringer i den eksisterende teknologi. Danmarks forskningsmæssige førerposition i forhold til integration af vedvarende energi i elnettet er f.eks. et afgørende parameter i forhold til produktion af grøn brint. Dertil kommer forskningsmæssige styrker inden for både katalyseprocesser, sektorkobling og balancering af energisystemer, som alle giver Danmark store fordele i forhold til at udvikle en effektiv grøn brintproduktion.¹⁸ De



Figur 3: Investeringer i forskning og udvikling inden for Innovationsfondens fire inno-missioner.

Kilde: Klimarådet, <https://klimaraadet.dk/da/tal-og-statistik>

¹⁶ <https://cipfonden.dk/wp-content/uploads/2023/03/Markedsvurdering-Danmarks-muligheder-i-en-fremtidig-brintoekonomi-1.pdf>

¹⁷ Agora Energiewende, "Breaking Free from Fossil Gas", 2023

¹⁸ AAU, KU, DTU et. al. Roadmap for Green Fuels in Transport and Industry Inno-mission 2, 2021

forskningsmæssige styrkepositioner understreges yderligere af, at TotalEnergies i 2022 valgte at etablere et "Centre of Excellence" med fokus på forskning og uddannelse inden for havvind, hybride systemer og produktion af grøn brint ved DTU Risø i samarbejde med DTU Vind og Energisystemer.¹⁹

Forskningen har bl.a. vist, at det er vigtigt at tænke i sektorkoblinger og balancering af energisystemet, hvilket er vigtigt ift. den fysiske placering af PtX-anlæg. Her er der et stort behov for central styring og planlægning, så anlæg placeres, hvor de kan tilsluttes fjernvarmenettet, har adgang til tilstrækkelige mængder "ultrarent" vand, VE og biogen CO₂ samt PtX-infrastruktur.

Endelig er der hensynet til borgerne, som hurtigt kan vende sig imod placeringen af store, industrikomplekser i deres nærområde. Alt i alt skaber det en kompleks planlægningsopgave, som i dag i stor udstrækning er lagt ud til kommunerne, der ikke nødvendigvis har de rette tekniske kompetencer til at foretage de rette vurderinger. Samtidig oplever kommunerne et krydspres i form af den konkurrence, der ligger i muligheden for at blive en del af "det næste vindmølleeventyr".

Man skal undgå at blive låst fast til en dyr og ineffektiv infrastruktur og PtX-produktionsfaciliteter – enten fordi man har overinvesteret på et for tidligt tidspunkt, eller fordi man i planlægningen ikke har taget højde for de gevinster, der kan være i form af fleksibelt forbrug, udnyttelse af overskudsvarme etc. Også derfor er det meget vigtigt, at der laves grundige analyser af det reelle fremtidige brintbehov og de samfunds- og ressourcemæssigt optimale placeringer af PtX-faciliteter. Disse hensyn skal balanceres med behovet for at lade den gryende PtX-industri komme i gang hurtigt, så de industrielle og forskningsmæssige styrkepositioner udnyttes bedst muligt.

Har vi nok grøn strøm?

Opskalering af PtX-kapaciteten vil over de næste årtier kræve udbygning af store mængder ny grøn strøm. Tabel 1 viser, at en fuld direkte (batterielektrisk) og indirekte (PtX) elektrificering af Danmarks transportsektor vil medføre et energibehov svarende til 12,3 GW. Dette er et scenarie, hvor Danmark producerer 300% flere PtX-brændstoffer til søfarten, end hvad der i dag tankes i Danmark, da Danmark er godt positioneret til at levere grønne brændstoffer til søfarten i Nordsøen og Østersøen.

Tages der højde for den forventede stigning i transportarbejdet frem mod 2050, stiger det samlede behov til 15,2 GW. I et scenarie, hvor transportarbejdet falder med 7,5%, justeres det samlede energiforbrug til 12,0 GW. Enhver begrænsning af transportarbejdet (samt energieffektiviseringer per kilometer) vil gøre det lettere at løse udfordringen med at sikre nok vedvarende energi. Her kan det f.eks. nævnes, at flere globale virksomheder (PwC, Pfizer mv.) har sat mål om at reducere arbejdsrelaterede rejser med 50% eller mere sammenlignet med pre-COVID. Også en kommende CO₂-beskatning af sø- og luftfart kan måske begrænse den forventede stigning i transportarbejdet. Udenfor transportsektoren kan en reduktion i forbruget af ammoniak som gødning (i fremtiden e-ammoniak) ligeledes have en gavnlig effekt i at reducere PtX-efterspørgselsniveauet.

Tabel 1: **Strømforbruget ved direkte (batterielektriske) og indirekte (Power-to-X) elektrificering af Danmarks transportsektor.**

	Power-to-X (GW)	Batteri-elektrisk (GW)
Personbiler	-	2,7
Varebiler	-	0,7
Lastbiler	-	0,6
Søfart	4,9	-
Luftfart (indenrigs)	0,2	-
Luftfart (udenrigs)	3,1	-
Total		12,3

Kilde: Rådet for Grøn Omstilling, egne beregninger, 2023

Men alt i alt betyder omstillingen fra fossile til PtX-baserede feedstocks (energi samt råvarer) på tværs af sektorer samt ambitionen om at eksportere PtX-produkter til udlandet, at der over de næste årtier kan forventes en betydeligt større udbygning af PtX end behovet til at omstille transportsektoren. For eksempel regner Energistyrelsen med et energiforbrug til PtX i omegnen af 125 TWh om året på PtX i 2050. I 2022 var Danmarks samlede elforbrug 35 TWh.

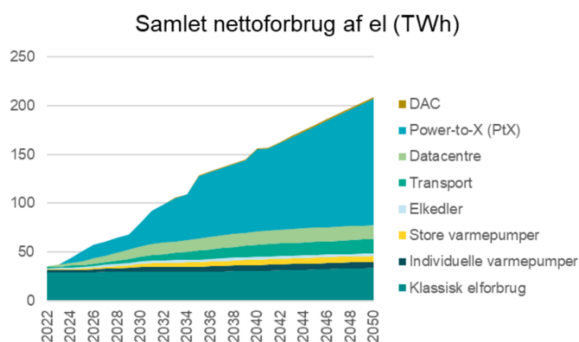
Det er derfor helt nødvendigt at planlægge en hurtigere udbygning af ren vedvarende energi, så Danmark ikke alene har nok grøn strøm til at elektrificere transporten, industrien og varmesektoren, men også får nok grøn strøm til de nye PtX-fabrikker, som er under planlægning rundt omkring i landet. Det er centralt, at udbygningen af

¹⁹ <https://corporate.totalenergies.dk/dtec-dtu-totalenergies-excellence-centre-clean-energy>

PtX ikke fører til et merforbrug af fossile energikilder i elsektoren selv i en overgangsperiode.

Danmarks samlede VE kapacitet var i 2022 10 GW, men der er bred politisk opbakning til massiv opskalering af VE (figur 4), og der er udpræget enighed om, at potentialet for VE i Danmark er massivt. Eksempelvis estimerer Klimarådet et umiddelbart VE-potentiale på mindst 32-83 GW, mens Klimapartnerskabet for Energi- og Forsyningssektoren estimerer et samlet teknisk maksimum potentiale på omkring 180 GW for havvind alene.

Figur 4: Samlet nettoforbrug af el (TWh). Dvs. ekskl. tab i nettet på ca. 7 pct.



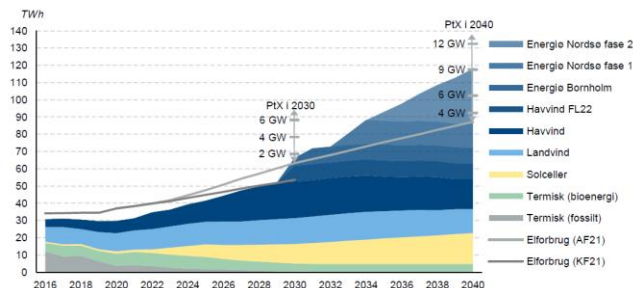
Kilde: Energistyrelsens analyseforudsætninger til Energinet 2022.

Danmark har et enestående potentiale for at fremstille ren vedvarende energi via store mængder hav- og landvindmøller, og vi kan udbygge meget hurtigere med solceller. En kritisk forudsætning er dog, at elnettets kapacitet udvides markant, hvilket kræver store milliardinvesteringer i både distributions- og transmissionsnettet. Det er afgørende at sikre de fornødne midler til at udbygge elnettet, så den grønne infrastruktur gøres klar at sikre en hurtigere opskalering med vedvarende energi.

I dag er der desværre en betydelig risiko for, at produktionen af PtX på den korte bane kan udløse et fossilt merforbrug i energisektoren, fordi udbygningen med sol- og vindenergi stadig går alt for langsomt. Som det fremgår af figur 5, overstiger Danmarks energiforbrug frem til 2030 allerede den forventede VE-produktion, og den forventede

PtX-produktion i 2030 øger afstanden mellem forventet forbrug og VE-produktionen²⁰.

Figur 5: Produktion og forbrug af strøm, samt indikation af yderligere forbrug ved power-to-X-udbygning.



Kilde: Klimarådets Statusrapport 2022

Men der er betydeligt politisk mulighedsrum for at opskalere produktionen af VE inden og frem mod 2030. Figur 5 illustrerer fint, hvor vigtigt det er at holde en høj udbygningshastighed. Her er det ekstra problematisk, at energigørerne ser ud til at blive forsinket, og der heller ikke er fundet en løsning på åben-dør ordningen, som ellers potentielt kunne levere 23 GW i 2030.

Der er derfor en meget betydelig risiko for, at udbygning af PtX-produktion og indfrielse af den danske målsætning om 4-6 GW elektrolysekapacitet kan betyde, at Danmark kan ende med at skulle øge sin import af strøm fra vores nabolande. Da denne strøm ikke er 100% vedvarende kan det også udløse et fossilt merforbrug i energisektoren. Politikerne har et stort ansvar for at sikre, at PtX-produktionen ikke "løber løbsk", særligt ift. elektrolyseanlæg i drift før 2028, som er fritaget fra EU-regler om at finansiere additional VE. Rådet for Grøn Omstilling vurderer, at en elektrolyse kapacitet udover 6 GW markant øger risikoen for et fossilt merforbrug i energisektoren.

Politikerne har et stort medansvar for at sikre, at denne grønne mangelsituation ikke opstår. Også derfor bør de sætte alt ind på at accelerere udbygningen af VE, herunder især solenergi og landvind. Det vil også være nødvendigt for at indfri Danmarks ambition om at være nettoeksportør af grøn energi i 2030.

²⁰ Fremskrivningerne af Danmarks elforbrug i dette afsnit er baseret på vedtaget politik for elektrificering af vejtransporten og kraftvarmesektoren. RGO anbefaler en fremskyndet elektrificering af disse sektorer, fx stop for salg af fossilbiler senest i 2025 samt at

kraftvarmesektoren er fri for fossile brændsler og træbaseret biomasse senest i 2035. Disse tiltag vil medføre et øget elforbrug, men samlet set ikke på et niveau, der rækker ved de centrale konklusioner i de refererede fremskrivninger.

På længere sigt estimerer Klimarådet, at det er ”mindre sandsynligt, at udbygning med Power-to-X vil føre til øgede globale udledninger” da udbygningen af VE i løbet af 2030’erne forventes at indhente energiforbruget. I lyset af de seneste forsinkelser for udbygning af havvind ligner det en lidt for optimistisk vurdering. Tværtimod er der risiko for, at PtX-fabrikkerne vil føre til en hurtigere udvidelse af elforbruget end den tilsvarende udbygning med vedvarende energi. Og samtidig er der stadig betydelige mængder af fossile energi i varmesektoren, transporten, industrien og landbruget, som skal omstilles og drives med elektricitet fra vedvarende energi. Det kan give et systemisk efterslæb. På den anden side vil en opskalering af PtX-produktionen skabe en øget efterspørgsel efter elektricitet, og det kan indirekte give flere markedsaktører incitament til at investere i mere VE. Stigende efterspørgsel efter den grønne strøm vil alt andet lige sikre en højere pris, især i de tidsrum hvor strømmen er billig (da der her vil være størst incitament for at producere PtX-brændstoffer).

Fortrængning af CO₂

PtX er aldrig grønnere end de byggesten, den samles af, og det er vigtigt at afveje, hvad der er den mest effektive vej til at fjerne CO₂. Brugen af grøn strøm i andre sektorer har således ofte en større direkte CO₂-

fortrængningseffekt end fortrængningen som følge af PtX-produktion.

Rådet for Grøn Omstilling har derfor lavet en række beregninger baseret på de nationale emissionsfaktorer, som det fremgår af tabel 2 nedenfor. Eksempelvis opnås den langt største direkte CO₂-fortrængning per GJ i varmepumper (op til 375 kg/GJ), herefter til elbiler i stedet for biler med forbrændingsmotor (op til 148 kg/GJ), mens PtX til skibsbrændstof kun fortrænger 47 kg/GJ. Derfor er det en central pointe, at udbygning af PtX-produktion ikke må underminere elektrificering af kraftvarmesektoren, vejtransporten mv. Dette kan dog, som anført ovenfor, modsvares af at sikre tilstrækkelig udbygning af VE. Dertil er der en række forhold, som er relevante at tage i betragtning.

I en national kontekst er tilstrækkelig forsyning af grøn strøm pt. ofte ikke den afgørende flaskehals i omstilling af bl.a. kraftvarmesektoren og vejtransporten, hvor elektrificering f.eks. begrænses af nølende udskiftning af biler med forbrændingsmotor med elbiler. Samtidig kommer PtX til at spille en vigtig rolle ift. at håndtere udsving i VE-produktionen ved at aftage strøm, når vinden blæser mere end Danmark kan forbruge nationalt og eksportere til vores nabolande. Det bør prismæssigt tilskyndes, at PtX-produktionen indrettes fleksibelt og i højst muligt omfang

Tabel 2: Klimagevinst ved forskellig anvendelse af grøn el

CO ₂ -fortrængning kg/GJ		Grøn el som alternativ	Grøn el via varmepumpe
Varme	Træpiller/flis	110 (42 ^{a)})	330 (125 ^{a)})
	Brænde	125	375
	Kul	104	312
	Olie	88	264
	Naturgas	62	186
Strøm (kraftvarme)	Træpiller/flis	110 (42 ^{a)})	Ikke relevant
	Kul	104	
	Olie	88	
	Naturgas	62	
Brændstof	Benzinbil fortrængt af elbil	146	Hvis 50 % varmetab fra P2X udnyttes i fjernvarmen
	Dieselbil fortrængt af elbil	148	
	Skibsbrændstof (via PtX)	39	47
	Flybrændstof (via PtX)	40 ^{b)})	48 ^{b)})
		60 ^{c)})	68 ^{c)})

a) Best case dvs. der medtages kun de udjævnede direkte klimaeffekter og ingen indirekte klimaeffekter (LULUCF).

b) Medregnet CO₂-fortrængning fra flybrændstof og diesel, gas m.v. (produceres simultant med kerosen ved P2X).

c) Hvis kerosin samtidig fjerner al opvarmning knyttet til NO_x, jetstriber, black carbon m.v. på længere flyturer.

Kilde: Rådet for Grøn Omstilling, egne beregninger, 2023.

producerer, når der er et overskud af strøm og nedjusteres når der strømmangel. Da videreførelse af brint til fx e-ammoniak og e-kerosen er mere energi- og tidskrævende at tænde og slukke end selve elektrolysen, bør disse processer i højere grad køre stabilt, mens brintproduktionen gøres fleksibel.

Derfor er det vigtigt at se PtX i Danmark i en europæisk og global kontekst. Internationalt set er Danmark godt positioneret til at udvikle og opskalere PtX, da vi har adgang til massive vindressourcer i Nordsøen, knowhow fra førende virksomheder og forskningsmæssige styrkepositioner (Topsoe, Ørsted, DTU mv.), investeringsvillig kapital (pensionsfonde, CIP mv.) og aktører i relevante sektorer (luft- og søfart) med høj betalingsvillighed for PtX-brændstoffer.

Dermed kan Danmark som foregangsland bidrage til at kickstarte en presserende grøn omstilling af sø- og luftfarten (på sigt vil der sandsynligvis være lavere omkostninger ved storskala ptx-produktion fra solenergi i bl.a. Australien og flere nordafrikanske lande, men Danmark kan ifølge CIP Fonden producere brint 5-10% billigere end de øvrige Nordsølande).

Ser man således dansk PtX som en brik i et større puslespil, der skal sikre global klimaneutralitet, giver det derfor mening at inddrage andre hensyn end margineffekten per kilowatt time. Dette understreges også af, at IPCC påpeger behovet for dybe reduktioner i alle sektorer samt FN's generalsekretær Antonio Guterres opfordring til klimahandling på alle fronter: "[Everything everywhere all at once](#)".

EU-regulering af PtX og vedvarende energi

Power-to-X i Danmark skal ses som en del af udviklingen på det europæiske marked. Og EU-reguleringen vil bestemme overordnede retningslinjer for produktion, distribution og brug af PtX-produkter i Danmark. EU-Kommissionen har fastlagt en række kriterier for, hvornår brint og brintbaserede brændstoffer kan klassificeres som grønne. Populært sagt skal der produceres PtX, når og hvor vinden blæser eller solen skinner. Og PtX-producenterne skal betale for udbygning af ny additionel VE, altså udover hvad der bygges til det generelle elnet. Det skal modarbejde, at produktionen af PtX ikke trækker grøn strøm ud af det generelle elnet og dermed medfører et fossilt merforbrug i elproduktionen. I praksis er kapital dog ikke den eneste begrænsende faktor, da også tilgængelige råstoffer,

arbejdskraft og arealer er begrænsede, og det kan derfor være svært at sikre absolut additionalitet. Samtidig står det klart, at PtX har betydelige praktiske, økonomiske og energisystemiske begrænsninger. Det er helt centralt at sikre, at anvendelsen begrænses til sektorer uden alternativer – der bør også sikres stærke incitamenter til at fremme høj energieffektivitet i PtX-industrien. Tager man størrelsen af den fremskrevne PtX-produktion i betragtning står det klart at selv marginale effektiviseringer kommer til at få stor betydning for det samlede el-forbrug til PtX.

Danmark kan spille en vigtig rolle som foregangsland indenfor udvikling og opskalering af produktion og brug af grønne PtX-brændstoffer i sø- og luftfarten, men det er vigtigt at gøre det klogt, at anvende energien med omtanke og stille høje sikkerhedskrav, så der ikke skabes nye klima- og miljøskader som følge af f.eks. lækage. Danmark skal konkurrere på høje standarder, og udnytte sine erhvervs-mæssige styrkepositioner. Både sø- og luftfarten er langt bagefter i den grønne omstilling, og Danmark kan, bl.a. på baggrund af store vindressourcer i Nordsøen og erfaringer indenfor vindenergi, spille en vigtig global rolle med at teste og udvikle nye værdikæder og forretningsmodeller.

Har vi nok grønt kulstof?

Brint er ofte ikke praktisk at bruge som direkte drivmiddel i langdistance sø- og luftfart, primært på grund af brintens lave energitæthed, som betyder at det fylder for meget. Derfor vil det ofte være nødvendigt at opgradere den grønne brint til fx e-kerosen til luftfarten eller e-metanol til søfarten²¹. Både e-kerosen og e-metanol kræver tilførsel af kulstof, ligesom der vil være brug for kulstof til at erstatte fossile råvarer i plastik og kemikalieindustrien. Samlet set estimerer Klimarådet et totalt behov for kulstof i form af CO₂ på mellem 20 og 38 Mt i et klimaneutralt Danmark.

I takt med at CO₂-kilderne udfases fra kraftvarmesektoren vil det blive en tiltagende udfordring at finde bæredygtige kilder til CO₂. Ifølge Klimarådet har Danmark et budget på 6 Mt bæredygtig biogen CO₂, altså mindre end tredjedel af det lave skøn for behovet for CO₂ (20 Mt). Klimarådets estimerer flugter med et studie fra Aarhus Universitet, som forudser et samlet dansk CO₂-behov på 23 Mt og et bæredygtigt biogent potentiale på 7 Mt.²²

På baggrund af den fremtidige mangel på bæredygtigt CO₂ bør kulstofholdige PtX-brændstoffer og produkter prioriteres

²¹ På sigt kan langdistance søfart bruge e-ammoniak som brændstof, hvilket både vil være billigere og grønnere end e-metanol, da ammoniak ikke indeholder kulstof.

²² Rasmussen et al., Scenarier for anvendelse af biomasseressourcer i fremtidens produktionssystemer for fødevarer, energi og materialer inden for rammerne af gældende politik for landbrug, miljø, klima, natur og energi (2022)

til de sektorer og processer, som ikke har adgang til tilgængelige alternativer. Det gælder eksempelvis luftfartsbrændstof og plastik, mens søfarten bør fokusere på brændstoffer uden kulstof såsom e-ammoniak. Dertil bør behovet for CCS minimeres mest og hurtigst muligt ved at gennemføre hastige og omfattende reduktion af udledning af drivhusgasser i alle sektorer, da hvert ton CO₂ lagret ikke vil være tilgængelig for PtX-produktion.

Figur 6: **Potentielt behov for kulstof til negative udledninger, samt til energi og udenrigstransport i 2050**

Behov for CO ₂ fra biomasse eller DAC til forskellige formål (mio. ton CO ₂)	Lavt skøn	Højt skøn
Kulstof til negative udledninger i Energistyrelsens 2050-scenarier	7,1	12
Kulstof til energiformål i Energistyrelsens 2050-scenarier, hvorfra CO ₂ ikke fanges	7,9	18
Kulstof til brændstof til udenrigsskibsfart	0	2,6
Kulstof til brændstof til udenrigsluftfart	3,0	3,4
Kulstof til negative udledninger til at opveje kondensstriber	1,9	2,3
Totalt behov for kulstof i form af CO₂ i 2050	19,9	38,3

Kilde: Klimarådets statusrapport 2022

Da PtX efter alt at dømme vil forblive en del af fremtidens klimaneutrale energisystem, bør det overvejes, i hvilket omfang øgede incitamenter for CCS af biogent kulstof underminerer adgangen til samme biogene kulstof for PtX (CCU). Det vil være problematisk, hvis PtX-produktionen begynder at benytte fossilt kulstof og dermed levetidsforlænger brugen af fossil energi. RGO anbefaler derfor, at biogent kulstof prioriteres til CCU frem for CCS. Selvom kulstofforbruget begrænses mest muligt og prioriteres til CCU, vil der i et klimaneutralt Danmark og EU stadig være behov for kulstof.



Rådet for Grøn Omstilling

Rådet for Grøn Omstilling er en uafhængig non-profit miljøorganisation, der har rådgivet om den grønne omstilling i mere end tre årtier. Som en grøn løsningstank vil vi levere konkrete, realiserbare og ambitiøse løsningsforslag, der kan accelerere omstillingen til et absolut bæredygtigt samfund.

For mere information

Kontakt: Rasmus Bjerring Larsen, Rådgiver - klima og transport

Telefon: 2889 4678

Mail: rasmus@rgo.dk

Kontakt: Jens Dahlstrøm Iversen, Seniorrådgiver – Energi og klima

Telefon: 3318 1932

Telefon: Jens@rgo.dk