



Analyseforudsætninger til Energinet 2021 – Power-to-X (PtX) og Direct Air Capture (DAC)

Baggrundsnotat

Kontor/afdeling
Systemanalyse

Dato
12. oktober 2021

J nr. 2021 – 6416

JPVG/MHVD/SLE

Indholdsfortegnelse

Introduktion	2
Udvikling frem mod 2040	2
Udvikling af PtX	2
Metode og antagelser	4
Afgrensning i AF21	4
Generelle antagelser om betydning og udvikling af PtX i Danmark og globalt.....	5
Import/eksport af PtX-brændstoffer i AF21	6
Dansk efterspørgsel efter PtX-brændstoffer i AF21	6
PtX-produktionsteknologier	8
Udviklingsforløb frem mod 2040 og 2050	9
Geografisk fordeling og overskudsvarme	9
Usikkerhed PtX	10
Elektrolyseanlæg	10
Efterspørgsel efter PtX-brændstoffer	11
Specifikke PtX-teknologier	11
Placering af elektrolyseanlæg og deres elforbrug	12
Usikkerhed DAC	12
Udvikling af DAC	12
DAC-teknologier	13
Metode og antagelser for DAC	14
Ændringer i forhold til AF20	15

Energistyrelsen

Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V

T: +45 3392 6700
E: ens@ens.dk

www.ens.dk



Introduktion

Dette notat omhandler Power-to-X (PtX) og Direct Air Capture (DAC). Forudsætninger for PtX i AF21 er uforandrede i forhold til AF20, idet der afventes afklaringer fra strategiarbejdet før større ændringer implementeres. Der er dog marginale ændringer i elforbruget i årene frem mod 2025, som skyldes mere viden om konkrete projekter. I AF21 introduceres for første gang DAC, der er en samlebetegnelse for teknologier til kulstoffangst fra luften. DAC antages at få en betydning for det danske energisystem i realisering af målet om klimaneutralitet senest i 2050. DAC indgår i kapitlet om PtX, idet den indfangne CO₂ kan finde anvendelse til produktion af kulstoffoldige brændstoffer produceret via PtX. Udviklingen for DAC er i AF21 afgrænset til den overordnede indflydelse på elsystemet og udfolder ikke i detaljeret grad specifikke teknologier. DAC indgår ikke som en del af det centrale forløb i AF21, men der præsenteres et spænd, der angiver mulige udfald for udviklingen af DAC til brug for følsomhedsanalyser.

Udvikling frem mod 2040

Udvikling af PtX

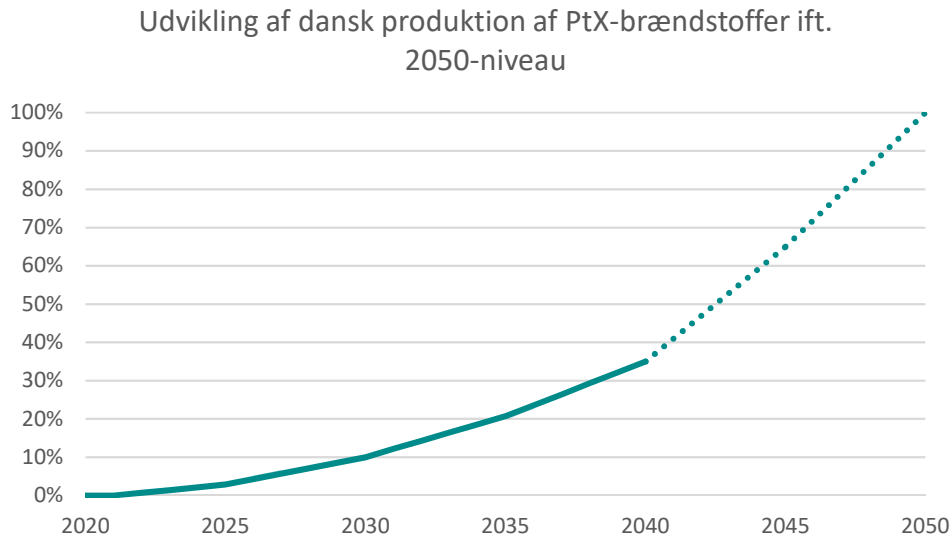
Produktionen af CO₂-neutrale brændstoffer baseret på PtX-teknologier forventes at få en betydning for det danske energisystem på langt sigt, når målet om klimaneutralitet senest i 2050 skal opfyldes¹. Produktionen af PtX-brændstoffer har et stort elforbrug, som på langt sigt forventes at udgøre en væsentlig andel af det samlede elforbrug i Danmark. Der forventes dog en gradvis udvikling, da teknologierne endnu ikke er fuldt ud kommercielle og i stand til at konkurrere med alternative VE-brændstoffer.

AF21 inkluderer en estimeret udvikling for PtX, som dog er afgrænset til den overordnede indflydelse på elsystemet og ikke i detaljeret grad ser på specifikke teknologier og brændstoftyper. Af denne grund er PtX antaget at kunne repræsenteres af elektrolyse i AF21. Forudsætningerne om PtX i AF21 følger forudsætningerne i AF20, idet der afventes afklaringer fra strategiarbejdet før større ændringer implementeres. Energistyrelsen er opmærksom på, at der er potentiale for udbygning med PtX-anlæg med eksport som primært formål. Dette undersøges ligeledes i strategiarbejdet og er derfor ikke inkluderet i AF21.

Antagelserne om PtX-brændstoffernes anvendelse i Danmark, og særligt tilhørende produktion heraf, er behæftet med meget stor usikkerhed, jf. *afsnit om usikkerheder*. Figur 1 viser det antagne udviklingsforløb for produktion af PtX-brændstoffer i perioden frem mod 2050. Det antages at produktionen af PtX-

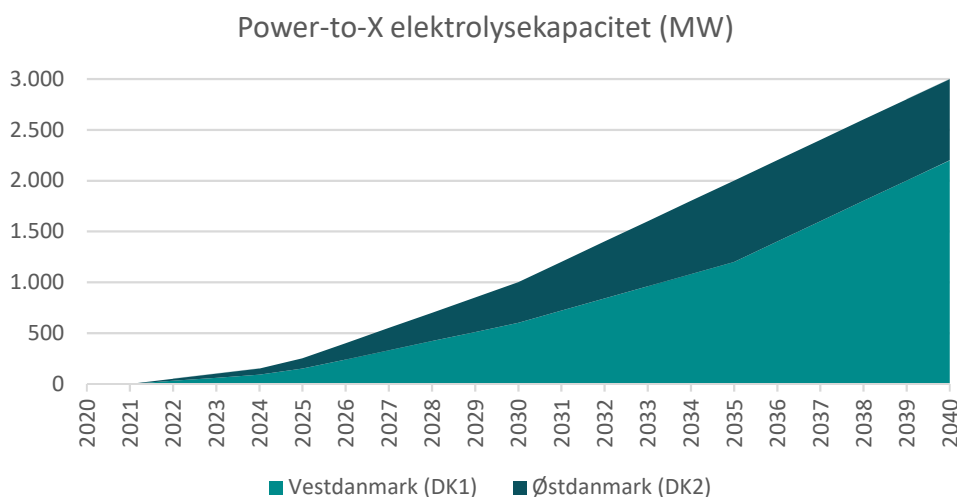
¹ Det forventes, at den danske anvendelse af el på sigt vil blive dækket udelukkende af VE-baseret elproduktion. Det antages, at der vil ske en yderligere udbygning med VE-baseret elproduktion i takt med at elforbruget stiger, hvorfor PtX-brændstofferne anses for at være CO₂-neutrale.

brændstoffer vokser i hele perioden frem mod 2050. Det antages yderligere at produktionen stiger hurtigst i perioden fra 2040 til 2050.



Figur 1: Skitse for det antagne udviklingsforløb for produktion af PtX-brændstoffer ift. det skønnede niveau i 2050, der ligger til grund for AF21-fremskrivningen.

Figur 2 viser udviklingen i elektrolysekapaciteten frem mod 2040, som følger udviklingstakten for produktionen af PtX-brændstoffer. Der forventes en gradvis udbygning med en kapacitet på ca. 1 GW i 2030 og ca. 3 GW i 2040.



Figur 2: Udvikling i elektrolysekapacitet (MW). Kapaciteten på elektrolyseanlæg er en relevant parameter for Energinet, og derfor vist her. Det er dog den forventede, samlede årlige produktion af PtX-brændstoffer, som er grundlag for fremskrivningen.

Udbygningen med elektrolyseanlæg er baseret på en række antagelser om et fremtidigt forbrug af PtX-brændstoffer i Danmark. Disse antagelser er forklaret i



nedenstående. Dertil er det antaget, at anlæggene vil have en gennemsnitlig drift på ca. 5.000 fuldlasttimer per år. Det forventede elforbrug til elektrolyse er således ca. 5 TWh i 2030 og 15 TWh i 2040.

Effekttrækket fra PtX vil først og fremmest være afhængigt af hvor meget PtX-produktion, der udbygges med i Danmark. Derudover vil selve elforbruget være afhængigt af, hvordan de enkelte anlæg drives, hvilket kan være vanskeligt at estimere, da der endnu ikke er erfaringer omkring dette.

Det forventes, at elektrolyseanlæggene, der er de væsentligste elforbrugende enheder i PtX-produktionen, vil drives med en høj grad af fleksibilitet i forhold til elnettet. Dels vil driften afhænge af elprissignaler og dels antages anlæggene at have vilkår som afbrydelige kunder. Som udgangspunkt kan udviklingen for PtX derfor ikke i sig selv antages at drive investeringer i hverken ny spidslast elproduktionskapacitet eller bagvedliggende netforstærkninger. Omvendt kan den mere fleksible drift af elektrolyseanlæg (set ift. andre, traditionelle elforbrugere) bidrage til indpasning af fluktuerende VE-elproduktion.

Det øgede elforbrug til produktion af PtX-brændstoffer antages at kunne dækkes af dansk VE-elproduktion. Der er derfor taget højde for dette elforbrug i forudsætningerne for udviklingen af særligt havvind, som forventes at være den væsentligste forøgelse af produktionskapaciteten. Dette er beskrevet i det særskilte baggrundsnotat herom.

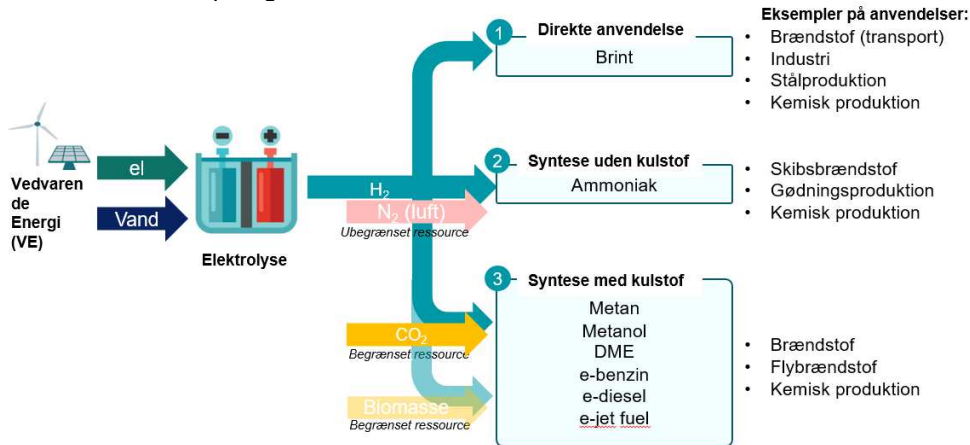
Produktionen af kulstofbaserede PtX-produkter forudsætter tilførsel af CO₂. For at PtX-produkterne kan certificeres som grønne, antages det, at den tilførte CO₂ skal være ikke-fossil. Biogen CO₂ er en begrænset ressource, og en andel af denne antages at skulle lagres for at skabe negative udledninger. Under disse forudsætninger opstår et behov for DAC, som kan dække CO₂-behovet.

Metode og antagelser

Afgrænsning i AF21

PtX er en betegnelse, der dækker over en række forskellige teknologier, der kan anvendes til produktion af CO₂-neutrale brændstoffer i gas- eller flydende form. Kulstofholdige PtX-produkter omfatter desuden hidtidig fossilt baserede produkter som fx plast- og tekstilmaterialer. Fælles for PtX-produkterne, hvad end det er brint, ammoniak eller kulstofholdige brændstoffer, er at brintproduktionen er baseret på VE. Der er tale om en meget bred vifte af potentielle teknologier, produktionskæder og slutprodukter, hvoraf kun en lille andel er kommercielle i større skala i dag. Med udgangspunkt i elektrolyse fra VE-el produceres brint, som kan anvendes direkte eller videreforarbejdes til enten ammoniak (uden brug af

kulstof) eller en række forskellige brændstoffer (kombineret med brug af kulstof). Dette er illustreret på figuren nedenfor.



Figur 3: Diagram over de overordnede produktionskæder for PtX-brændstoffer (flydende eller gasformig). Kilde: Energistyrelsen.

PtX inkluderes i AF21 kun på et overordnet niveau med det formål at estimere et fremtidigt effekttræk og tilhørende elforbrug, da dette er den væsentligste faktor i forhold til Energinets planlægningsopgaver. Der udarbejdes i AF21 således ikke vurderinger af præcist hvilke typer af brændstoffer, der produceres, i hvilke sektorer de anvendes eller hvilke teknologier, der tages i brug i forbindelse med slutanvendelsen. Der anvendes gennemsnitlige antagelser, der dækker bredt over de forskellige teknologier i produktionskæderne ud fra en forventning til et samlet forbrug af PtX-brændstoffer.

På langt sigt kan slutprodukterne (brint, e-metan) have en mere væsentlig indvirkning på gasnettet, men omfanget er dels usikkert, og forventes desuden ikke at ske på kortere sigt og er derfor ikke inkluderet i AF21.

Generelle antagelser om betydning og udvikling af PtX i Danmark og globalt

Udviklingen i PtX afhænger af en lang række faktorer, der overordnet kan opdeles i forhold til hhv. den danske anvendelse og den danske produktion af PtX-brændstoffer. De væsentligste faktorer og usikkerheder, der afgør udviklingen forventes at være:

1. Mulighederne for en bæredygtig anvendelse af VE-brændstoffer uden stor import af biomasse. Dette er sandsynliggjort bl.a. i Energistyrelsens vind- og brint-scenarier fra 2014². Antagelser om ressourcebegrænsningerne på fx kulstof kan have betydning for anvendelse af PtX- og andre typer VE-brændstoffer på lang sigt.

² <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/scenarieanalysen>



2. Danmarks position i det internationale marked for VE-brændstoffer, som afhænger af den teknologiske udvikling og modning af markederne. Afhængigt af konkurrenceevnen for danskproducerede brændstoffer samt udviklingen af en fælles europæisk brintinfrastruktur vil dette have betydning for omfanget af import/eksport af PtX-brændstoffer.
3. Regulatoriske rammevilkår både på produktions- og efterspørgselssiden: PtX er omfattet af meget forskellig regulering på tværs af de forskellige sektorer, både på europæisk og nationalt niveau, hvilket har direkte betydning for vilkårene for produktion og anvendelse af PtX-produkter.

AF21 tager udgangspunkt i en langsigtet udvikling, hvor både den danske anvendelse og produktion af PtX-brændstoffer ligger i midten af et muligt udfaldsrum for de tre overordnede parametre.

Import/eksport af PtX-brændstoffer i AF21

En udbygning med kapacitet til produktion af PtX-brændstoffer, der specifikt er møntet på eksport kan have betydning for den danske infrastruktur, men dette inkluderes ikke særskilt i AF21. Ligesom der kan opstå produktion af fx brændstoffer, der anvendes til nettoeksport, kan der også være import af brændstoffer. AF21 er baseret på, at produktion og forbrug af PtX-brændstoffer til at dække energibehov i Danmark balancerer på langt sigt. AF21 tager således afsæt i det danske system ud fra et nationalt fokus hvor forbruget og produktionen følges ad. Derfor forholder AF21 sig ikke yderligere til Danmarks position i de internationale markeder for PtX-brændstoffer.

Som del af udviklingen i perioden 2020-2040, som AF21 dækker, kan der blive etableret elektrolyseanlæg med udgangspunkt i produktion af brændstoffer til eksport, evt. i tilknytning til eller på energioerne. Det er samlet set endnu usikkert, hvordan elektrolyseanlæggene bedst indgår i det danske elsystem, herunder mulighederne for samplacering nær VE-kilderne for at reducere behovet for store og lange effekttransporter, så elektrolyseanlæggene bidrager til en samlet effektiv udvikling af elsystemet. Dette beskrives derfor ikke i antagelserne i AF21, så netop de relevante spørgsmål og emner vedr. disse forhold kan analyseres nærmere pba. AF21.

Dansk efterspørgsel efter PtX-brændstoffer i AF21

Den langsigtede målsætning om klimaneutralitet i 2050 anvendes som pejlemærke for den forventede udvikling af PtX på lang sigt. Inden for en national ramme forventes det, at det samlede danske energiforbrug dækkes af elektrificering og CO₂-neutrale brændstoffer svarende til den mængde, der kan produceres ud fra danske ressourcer. PtX-brændstoffer forventes primært at kunne anvendes inden for erhverv og transport.



PtX-teknologierne er generelt en mere teknisk kompleks og økonomisk omkostningsfuld måde at opfylde energibehov end via direkte elektrificering, energieffektivisering, anvendelse af biometan (opgraderet biogas) og nogle typer biobrændsler. CO₂-neutrale PtX-brændstoffer vil derfor som udgangspunkt i højere grad kunne prioriteres til de anvendelser, hvor disse muligheder er fuldt udnyttede og/eller ikke vurderes hensigtsmæssige (som følge af fx enten tekniske eller ressourcemæssige begrænsninger).

Der er opstillet to forløb med forskellige grader af behov for PtX-brændstoffer ud fra, hvor stor en andel af det endelige energiforbrug, der kan dækkes af andre teknologier og brændstoffer. Udviklingen i AF21 baseres på et gennemsnit mellem de to udviklingsforløb. Dette skyldes, at der er stor usikkerhed omkring den fremtidige teknologiske udvikling og deraf mulighederne og begrænsningerne i at anvende andre teknologier end PtX.

I tabellen herunder fremgår antagelserne for andelen af energibehovet, der antages at skulle dækkes af PtX-brændstoffer på langt sigt (2050). I pejlemærket for den langsigtede efterspørgsel i 2050 inkluderes der ikke særskilt efterspørgsel fra andre lande eller til andre typer af produkter. Produktion til øvrige formål eller eksport kan i praksis være en del af den løbende udvikling på området frem mod 2050, men der tages ikke stilling til forholdet mellem import og eksport i perioden 2020-2040. Antagelserne om den langsigtede efterspørgsel tager udgangspunkt i en fortsat udviklingstakt som i 2040 og frem. Andelen af den langsigtede energimængde, som antages at blive erstattet med PtX-baserede brændstoffer fremgår som et interval med et øvre og nedre udfaldsrum.

Sektor	Anvendelse	Antaget langsigtet efterspørgsel (PJ)	Antaget andel der dækkes af PtX-brændstoffer*	
			Øvre udfaldsrum	Nedre udfaldsrum
Industri*	Gasformigt brændstof	12	50%	0%
	Flydende brændstof	15	100%	50%
Transport	Varebiler	21	25%	0%
	Lastbiler	27	50%	0%
	Busser	4	50%	0%
	Luftfart, udenrigs	45	100%	0%
	Luftfart, indenrigs + forsvar	2	100%	0%



	Søfart	14	100%	50%
I alt (PJ)		140	105	15

* Her inkluderes kun brændstofforbrug, der ikke umiddelbart kan dækkes af direkte elektrificering og energieffektivisering. Brændstofforbruget er derfor primært til højtemperatur procesenergi og intern transport. Intern transport er erhvervstransport, der foregår i køretøjer og maskiner, fx entreprenørmaskiner, traktorer, mejetærskere, fiskekuttere og trucks. Energiforbrug til anden erhvervstransport, såsom varebiler, indgår i transportsektorens energiforbrug.

Tabel 1: Antagelser om udfaldsrummet for efterspørgslen på VE-brændstoffer til at dække det danske energiforbrug i industri- og transportsektoren i 2050 og hvor stor en andel der er antaget dækket af PtX-baserede brændstoffer. Andelen af PtX-brændstoffer afhænger især af de økonomiske muligheder og ressourcemæssige begrænsninger for andre teknologier, der forventes at blive anvendt før PtX, som fx teknologier til direkte elektrificering.

Der ses derfor et meget bredt spænd for den mulige efterspørgsel på lang sigt, hvor PtX-brændstoffer kan tænkes at dække mellem 15 og 105 PJ af den samlede efterspørgsel på brændstoffer i de angivne sektorer på 140 PJ. Middelværdien svarer til ca. 60 PJ eller 45% af efterspørgslen. Både det samlede forbrug og andelen, der dækkes af PtX, kan være væsentligt højere eller lavere for de enkelte sektorer, og AF21 er baseret på gennemsnittet på tværs.

PtX-produktionsteknologier

De tekniske data for forskellige PtX-teknologier er i udgangspunktet baseret på Energistyrelsen og Energinets Teknologikatalog for fornybare brændstoffer³.

Der tages udgangspunkt i, at det fulde behov for brændstoffer opfyldes ved brint og brændstoffer produceret på brint med efterfølgende syntese til forskellige typer af slutprodukter i form af både kulstofholdige og ikke kulstofholdige brændstoffer. Virkningsgraden for brintproduktionen (elektrolyse) er ca. 68%⁴, og virkningsgraden for en efterfølgende synteseprocess afhænger af typen af proces og brændstof. Det er antaget, at kulstofkilder er baseret på affaldsforbrænding, proces-udledninger fra industrien, biogas og i mindre omfang biomasseforbrænding eller DAC. Dette er dog udelukkende beregningstekniske antagelser ift. virkningsgrader, og der er ikke i AF21 taget yderligere stilling til typen af eventuelle kulstofkilder.

Der er antaget en sandsynlig brændstofftype for de forskellige anvendelser, som ligger til grund for beregning af elforbruget og eleffekten. Dette er blot bagvedliggende antagelser, der således ikke kan anvendes til andre analyser af udviklingen i PtX end elforbruget i AF21.

Der tages højde for, at produktionen af nogle typer af brændstoffer giver flere slutprodukter, som også kan anvendes til at dække andre energibehov. Dette er bl.a. tilfældet for produktionen af VE-flybrændstof, der vil have en samproduktion af

³ <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/teknologikataloger/teknologikatalog-fornybare>

⁴ Forventet elvirkningsgrad for teknologien i 2030, jf. Teknologikataloget.



andre brændstoffer, fx VE-benzin, der kan anvendes til at dække energibehovet i den tunge transport (antaget anvendt i lastbiler). Udnyttelsen af samproduktionen giver et lavere elforbrug til produktion af PtX-brændstof i den tunge transport.

Udviklingsforløb frem mod 2040 og 2050

Ud fra de angivne antagelser, vil der være et behov for PtX-baserede brændstoffer på mellem 15-105 PJ i 2050.

Der forventes en længere indfasningsperiode for teknologierne, da der ikke findes kommercielle anlæg i større skala eller er besluttede investeringer om udbygninger til produktion af de CO₂-neutrale og mere avancerede, kulstofholdige brændstoffer på nuværende tidspunkt. Forventninger til konkrete anlæg på kortere sigt er inkluderet i fremskrivningen, hvilket dækker to projekter, der har modtaget tilsagn om støtte⁵ samt fremtidige anlæg som følge af klimaaftalen juni 2020 på i alt ca. 130 MW.⁶

Udviklingstakten forventes derfor at være forholdsvis lav frem til 2030 for derefter at stige i perioden 2030-2040. Den største del af udviklingen mod det langsigtede mål forventes at ligge i perioden efter 2040. Dette er baseret på forventningerne om, at PtX-løsningerne særligt vil bidrage til at nå det langsigtede mål om klimaneutralitet, ligesom modenheden af teknologierne generelt er lavere end andre løsninger til CO₂-reduktion. Udviklingsforløbet for PtX er præsenteret med en gradvis udbygning af elektrolysekapacitet fra 2040 frem mod år 2050 (se figur 1).

Slutpunktet i 2050 er baseret på et forventet nationalt behov. For perioden 2020-2040 som AF21 dækker, er der ikke lavet en konkret vurdering af nationalt behov til opfyldelse af eksempelvis 70%-målet i 2030, da dette kan opfyldes med varierende grad af PtX. En del af produktionen kan derfor godt gå til eksport. Usikkerheden omkring den samlede produktion af PtX-brændstoffer i Danmark vurderes derfor umiddelbart særlig stor i opadgående retning fra det centrale forløb, da der også på kort sigt kan etableres anlæg med udgangspunkt i muligheder for eksport.

Geografisk fordeling og overskudsvarme

Der er i AF21 lavet en overordnet vurdering af placeringen af elektrolyseanlæg i hhv. Vest- og Østdanmark. Det er antaget, at størstedelen af kapaciteten vil være placeret i Vestdanmark bl.a. fordi der vurderes at være flere relevante placeringer for større anlæg og der er en højere grad af elproduktion fra havvind i Nordøsen. Der forventes dog også at blive placeret anlæg i Østdanmark. Der er

⁵ GreenLab i Skive og HySynergy i Fredericia. Se bl.a.: <https://presse.ens.dk/news/energistyrelsen-stoetter-power-to-x-projekter-med-128-mio-kr-390387>

⁶ Etablering af elektrolyseanlæg som følge af aftale mellem Danmark og Nederlandene om statistisk overførsel af VE-andele inkluderet i klimaaf tale. Se bl.a.: <https://fm.dk/media/18085/klimaaf tale-for-energi-og-industri-mv-2020.pdf>



skønsmæssigt lavet en fordeling af kapaciteten på 60% i Vestdanmark og 40% i Østdanmark frem til 2035. Efter 2035, hvor det umiddelbare potentiale for havvind i Østdanmark er udnyttet, udbygges ny kapacitet alene i Vestdanmark. I 2040 er ca. 80% af kapaciteten således placeret i Vestdanmark.

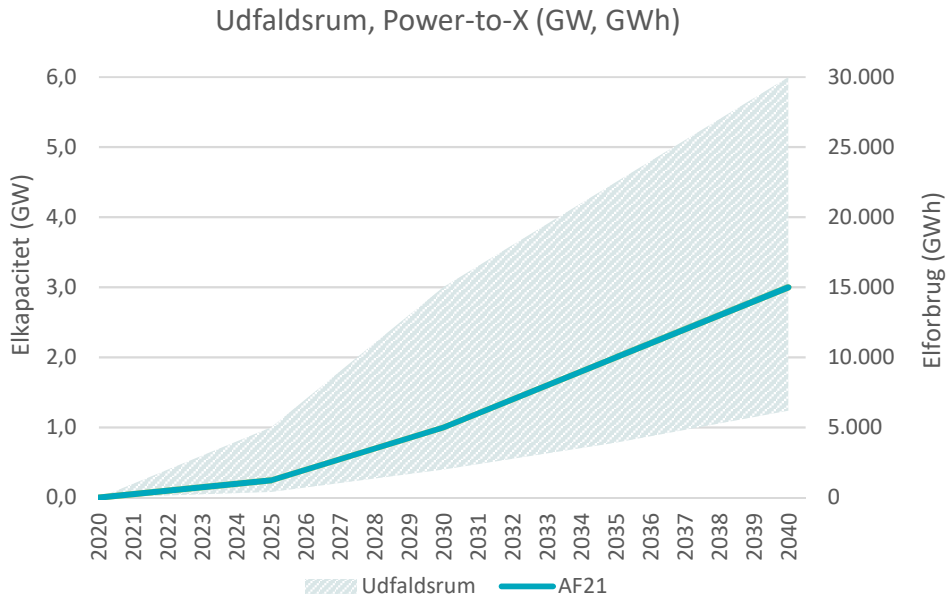
Der er ikke lavet yderligere vurderinger af elektrolyseanlægs geografiske placering i AF21, da dette bl.a. kan afhænge af hensyn til el- og gasinfrastrukturen.

Det er muligt at anvende overskudsvarmen fra elektrolyse til brug i fjernvarmen. Dette kræver, at et givent elektrolyseanlæg er placeret i nærheden af et fjernvarmenet. Til analyser af samspil mellem elektrolyse og fjernvarme anbefales Energinet at antage, at 10% af elforbruget til et givent elektrolyseanlæg omsættes til overskudsvarme, der kan anvendes til fjernvarme. Det teknologiske potentiale for udnyttelse af overskudsvarme er højere end 10%, og antagelsen afspejler altså en forventning om at ikke al overskudsvarmen vil blive udnyttet i fjernvarmenettet, fx pga. driftsmønstre, geografisk placering osv.

Usikkerhed PtX

Elektrolyseanlæg

Udviklingen af elektrolyseanlæg er underlagt stor usikkerhed, og Energistyrelsen anbefaler derfor, at Energinet supplerer AF21 med følsomhedsanalyser på udviklingen og omfanget af elektrolyse. Figuren herunder angiver det udfaldsrum, Energistyrelsen har udarbejdet ifm. AF21, som Energinet anbefales at tage udgangspunkt i. Ud over det absolutte niveau kan der også laves følsomhedsberegninger på udviklingens indvirkning på elinfrastrukturen, herunder muligheder og effekter ved samplacering af elektrolyseanlæg tæt ved VE-kilderne (på energiø, nær ilandføring af havvind eller sammen med fx landbaseret vind/sol) således at behovet for store effekttransporter over længere afstand i elinfrastrukturen reduceres.



Figur 4: Udfaldsrum for udviklingen i elkapacitet for elektrolyseanlæg frem mod 2040, som det anbefales, Energinet anvender til følsomhedsberegninger. De illustrerede usikkerheder vedrører mængden af PtX der fremstilles til forbrug i Danmark, jf. den generelle metodeantagelse. De angivne kapaciteter er indikative ud fra Energistyrelsens simuleringer og antagelser om virkningsgrader.

Efterspørgsel efter PtX-brændstoffer

Den primære usikkerhed er omfanget af efterspørgslen efter PtX-brændstoffer, som især er betinget af den generelle vækst i energiforbruget og mulighederne for at anvende andre teknologier til dækning af energiforbruget inden for transport og erhverv, herunder begrænsninger i adgangen til bæredygtige kulstofkilder. De tekniske muligheder og omkostninger for at lave direkte elektrificering og energieffektiviseringer er en vigtig parameter, ligesom de tilgængelige CO₂-ressourcer fra biogas og biomasse kan være begrænsende og også få betydning for den langsigtede anvendelse af PtX.

Produktionen og efterspørgsel af PtX-brændstoffer vil som nævnt også være påvirket af de regulatoriske rammevilkår, både i EU og nationalt, samt af det internationale marked og Danmarks placering heri, dvs. mulighederne for eksport og import, som kan påvirke den samlede udvikling i elforbruget til PtX markant, både på kort og lang sigt. Usikkerhederne omkring import/eksport er ikke nærmere undersøgt i AF21.

Specifikke PtX-teknologier

Der er usikkerhed omkring hvilke konkrete teknologier, der vil vinde indpas, og hvordan udviklingen af dem bliver i forhold til effektivitet og økonomi. Dette gælder både ift. teknologier til produktion såvel som anvendelse af PtX-brændstoffer.



En væsentligt anderledes teknologiudvikling end antaget vil kunne fremskynde udviklingen i kapacitet for PtX-anlæg eller udskyde den i forhold til det angivne forløb. Dette gælder bl.a. teknologierne til termisk forgasning af biomasse, som endnu ikke er kommercielle, men forventes at blive det frem mod 2040, og hvor brint fra elektrolyse vil kunne indtænkes i forskellige anlægsdesign. Det vurderes dog, at usikkerheden omkring disse teknologier især ligger efter 2030.

Der bør anvendes specifikke tekniske data i det omfang, der analyseres på mere konkrete udviklinger, hvor Energinet har kendskab til den forventede anvendte teknologi og elforbrug i forbindelse med produktionen.

Placering af elektrolyseanlæg og deres elforbrug

Da der endnu ikke er etableret kommercielle anlæg i større skala eller truffet endelige beslutninger om det, er den konkrete placering af fremtidige anlæg usikker. Der er mange faktorer, der spiller ind på valget af placeringer for anlæggene, og det anbefales derfor, at der udføres følsomhedsberegninger med forskellige geografiske placeringer af elforbruget.

Usikkerhed DAC

I AF21 præsenteres et spænd, der angiver mulige udfald for udviklingen af DAC til brug for følsomhedsanalyser. Udviklingen af DAC er behæftet med stor usikkerhed grundet teknologiens umodenhed. DAC er kun demonstreret i begrænset omfang og teknologien er ikke kommercialiseret. Denne usikkerhed er afspejlet i spændet over antaget CO₂-fangst fra DAC i 2050.

Udvikling af DAC

Anvendelse af kulstoffangst fra luften – DAC er en teknologitype, som bruges til at fange CO₂ direkte fra luften. Efterfølgende kan man enten lagre den indsamlede CO₂ i geologiske lagre også kendt som Carbon Capture and Storage (CCS), eller genanvende CO₂'en til brændstofproduktion med brint fra elektrolyse også kendt som Carbon Capture and Utilisation (CCU).

DAC antages at få en betydning for det danske energisystem, når målet om klimaneutralitet senest i 2050 skal opfyldes. DAC har et stort elforbrug, som kan udgøre en væsentlig andel af det samlede elforbrug i Danmark. Der er dog stor usikkerhed om teknologiens langsigtede udbredelse i Danmark, ligesom der må forventes en gradvis indfasning, da teknologierne endnu ikke er fuldt udviklede.

Pga. den betydelige usikkerhed om anvendelsen af DAC i Danmark, inkluderer AF21 ikke DAC i det centrale forløb. Der præsenteres i stedet forudsætninger til følsomhedsberegninger for udbredelse af DAC. Følsomhedsberegningerne er afgrænset til den overordnede indflydelse på elsystemet og tager ikke i detaljeret



grad højde for specifikke teknologier. DAC kræver, ligesom elektrolyse, store mængder strøm. Dette kan skabe konkurrence om elektriciteten blandt DAC og elektrolyseteknologier. Antagelserne til følsomhedsberegninger om udbredelse af DAC i Danmark er behæftet med meget stor usikkerhed, jf. afsnit om usikkerheder.

Elforbruget til DAC-anlæg er baseret på antagelser om en fremtidig efterspørgsel på CO₂ fanget fra atmosfæren på 1-10 mio. ton CO₂ i 2050. Efterspørgslen på CO₂ fanget via DAC er behæftet med stor usikkerhed, og afhænger bl.a. af hvordan målet om klimaneutralitet opnås, herunder behovet for kulstofbaserede PtX-brændstoffer og behovet for negative udledninger som kompensation for udledninger i fx transport- og landbrugssektorer. Herpå er der antaget virkningsgrader samt en gennemsnitlig drift på ca. 8.000 fuldlasttimer per år. Det forventede elforbrug til DAC er således ca. 0,06-0,60 TWh i 2030 og 0,58-5,94 TWh i 2040.

DAC-teknologier

AF21 inkluderer et spænd for DAC, til brug for følsomhedsanalyser. De tekniske data for DAC-teknologi er baseret på Energistyrelsens Teknologikatalog for procesvarme og carbon capture⁷. På grund af teknologiens umodne stadie er de tekniske data underlagt stor usikkerhed.

Teknologien DAC kan indfange CO₂ fra den atmosfæriske luft, som omgiver os. Konceptet blev introduceret omkring årtusindeskiftet og er i dag en umoden teknologi, som er demonstreret i begrænset skala. Der foregår en del udvikling af forskellige DAC-løsninger i laboratorier og enkelte demonstrationer gennem pilot- og kommercielle projekter. De to mest modne typer af DAC-teknologi adskiller sig fra hinanden ved at benytte hhv. høje og lave temperaturer. Lavtemperaturløsningen beskrives kort neden for.

Lavtemperatur DAC

I lavtemperatur DAC anvendes adsorption til at fange CO₂ fra luften. Denne adsorption sker ved et aktiveret filter, som gør at CO₂'en klæbes fast til det. En trækventilator sørger for et konstant flow af luft gennem filteret. Efter nogle timer vil filteret være mættet af CO₂ og skal derfor regenereres. Dette sker ved at varme filteret op til omkring 100 grader (85-100°C), hvilket frigør CO₂'en til et koncentreret flow med en renhed på mellem 98-99,9% CO₂. Efter regenereringen køles filteret ned og er klar til en ny cyklus.

⁷ Energistyrelsens Teknologikatalog for procesvarme og carbon capture, link: <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/teknologikataloger/teknologikatalog-procesvarme-og-carbon>



Processen for lavtemperatur DAC kræver en række inputs. Først og fremmest er der behov for luft og der bruges elektrisk energi til trækventilator, vakuumpumpe, kompressor, kølevandpumpe og eventuelt et køletårn. Derudover er der behov for varme til regenerering af filteret. Dette varmebehov kan potentielt dækkes af overskudsvarme fra andre processer.

Metode og antagelser for DAC

DAC indgår ikke som en del af det centrale forløb i AF21. Der præsenteres i stedet forudsætninger, der kan indgå i følsomhedsberegninger, hvor DAC indgår som særskilt elforbruger.

I anbefalingerne til følsomhedsscenarier antages det, at der indfanges mellem 1-10 mio. ton CO₂ årligt gennem DAC i 2050, hvor 1 mio. ton CO₂ afspejler et lavt skøn, mens 10 mio. ton CO₂ afspejler et højt skøn. Usikkerhederne i forbindelse med udbredelse og opskalering af DAC er væsentlige, og udfaldsrummet kan afvige fra det her skitserede. Blandt andet kan ændringer i arealanvendelse ifm. biodiversitetsforpligtelser nedbringe behovet for at indfange CO₂ fra luften. For at estimere udbredelsen af DAC i 2030 og 2040 antages en lineær udvikling. Det er derfor yderligere antaget at der i 2030 bliver indfanget 5% af hvad der bliver indfanget i 2050. Med en lineær fremskrivning betyder det, at der bliver indfanget mellem ca. 50.000 og 500.000 ton CO₂ i 2030 og mellem ca. 500.000 og 5.000.000 ton CO₂ i 2040. På baggrund af udfaldsrummene for 2030 og 2040 beregnes det nødvendige elforbrug til DAC.

Til beregning af elforbruget i følsomhedsscenerierne antages det, at betalingsvilligheden for CO₂ fra DAC-anlæggene er ca. 1.000 kr., således at DAC-anlægget vil være i drift, når omkostningen er mindre end dette. Det antages yderligere, at DAC-kapaciteten i 2030 er hhv. 7 MW og 75 MW for det lave og det høje skøn og at DAC-kapaciteten i 2040 er hhv. 70 MW og 750 MW for det lave og det høje skøn. Den geografiske placering antages at være i DK1. Elforbruget bliver da som angivet i tabel 2 Det er dog udelukkende en beregningsteknisk antagelse, som ikke afspejler en vurdering af, hvor DAC bedst placeres.

Elforbruget til DAC antages at være 1,14 MWh/ton CO₂. Antallet af fuldlasttimer med de givne input er ca. 8.000 timer om året.

	Indfanget CO₂ (antaget)	DAC-kapacitet (antaget)	Elforbrug (beregnet)
2030	0,05 – 0,5 mio. ton CO ₂	7 – 75 MW	0,06 – 0,58 TWh
2040	0,5 – 5 mio. ton CO ₂	70 – 750 MW	0,06 – 5,94 TWh



Tabel 2: Forudsætninger til brug for følsomhedsberegninger for udbredelse af DAC. Antaget indfangning af CO₂ fra DAC, antaget DAC-kapacitet og estimeret elforbrug til DAC i 2030 og 2040.

Overskudsvarme er ikke inkluderet og ligeledes er der ikke gjort antagelser om kobling til fjernvarmenettet.

Ændringer i forhold til AF20

Introduktionen af DAC som en særskilt type elforbruger er ny i forhold til AF20. Det præsenterede spænd for DAC kan benyttes til følsomhedsberegninger.

Analyseforudsætningerne for PtX er ikke ændret i forhold til AF20, dog med mindre ændringer i årene inden 2025, som skyldes mere viden om konkrete projekter.