



Fleksibilitet fra PtX-anlæg

Kontor/afdeling
PtX-sekretariatet
Center for elektrificering

Dato
30.10.23

Resumé

Power-to-X forventes at spille en nøglerolle i integrationen af mere VE i energisystemet samtidig med, at PtX-brændstoffer kan bruges som alternativ til fossile brændsler, særligt hvor det ikke er muligt eller omkostningseffektivt at elektrificere direkte. PtX-anlæg har potentiale til på sigt at blive den største elforbruger i Danmark. I Analyseforudsætningerne til Energinet 2023 regnes med et elforbrug i 2040, der er mere end dobbelt så stort som det samlede danske elforbrug i dag. Fleksibel drift af PtX-anlæg ift. elsystemet er derfor afgørende for at kunne opretholde samme grad af forsyningssikkerhed, som vi har i dag, og for at PtX kan understøtte integrationen af VE. Såfremt anlæggene ikke opereres fleksibelt, kan det lede til betydelige udfordringer for effekttilstrækkelighed og medføre risiko for strømafbrydelser.

PtX-taskforcen har som en del af arbejdet med at understøtte målsætningen i PtX-aftalen om 4-6 GW elektrolyse i 2030 gennemført en analyse af tekniske og økonomiske forhold, der påvirker fleksibilitet fra PtX-anlæg. Analysen er gennemført med inddragelse af centrale aktører med fokus på de væsentligste faktorer, herunder tekniske og økonomiske forhold, som påvirker fleksibilitet fra PtX-anlæg.

Fleksibel drift afhænger af de rette forudsætninger

Analysen viser, at det som udgangspunkt er muligt at operere PtX-anlæg fleksibelt ift. elsystemet og dermed understøtte forsyningssikkerheden i Danmark. Den fleksible drift afhænger dog af en række forudsætninger, herunder tekniske forhold, markedsperspektiver og regulatoriske rammevilkår. Hvis forudsætningerne ikke kommer på plads, kan det medføre, at der ikke er klare incitamenter til at operere PtX-anlæg fleksibelt.

Tekniske forhold

PtX-teknologier har som udgangspunkt de tekniske forudsætninger for at kunne opereres fleksibelt. Særligt elektrolyseteknologierne kan agere fleksibelt, men viderekonverteringsanlæg til produktion af mere avancerede PtX-brændstoffer som fx ammoniak og metanol forventes også at kunne regulere op og ned, dog i mindre grad end elektrolyse. **Selvom det teknisk er muligt at operere PtX-anlæg fleksibelt, er det uvist, hvor meget fleksibel drift påvirker effektivitet og**

Energistyrelsen

Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V

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

www.ens.dk



levetid for anlæggene. Denne uvished kan have betydning for i hvor stor grad, PtX-operatører vil udnytte fleksibilitetsmulighederne, hvorfor der fortsat er brug for forskning, udvikling og demonstration i de relevante teknologier.

Etablering af brintinfrastruktur en forudsætning for at opnå fuldt fleksibel drift fra PtX-anlæg. Brintinfrastruktur kan mindske behovet for synkron produktion fra elektrolyse- og viderekonverteringsanlæg, og dermed undgå produktion af brint, når elprisen er høj.

Markedsperspektiver

Elprisen udgør det største omkostningselement i produktion af PtX-brændstoffer. Derfor kommer konkurrencedygtigheden på PtX-brændstoffer hovedsagligt til at afhænge af de elpriser, anlæggene betaler. Det betyder grundlæggende, at **PtX anlæg har et stærkt økonomisk incitament til at være i drift, når elprisen er lav, og omvendt neddrose eller lukke anlægget, når elprisen er høj.** Der er dog nogle elementer, som kan udfordre denne mekanisme og dermed forsyningsikkerheden.

For ikke at udviske incitamenterne til fleksibel drift, er det **vigtigt, at der fortsat er tydelige markedssignaler på elpriserne.** Prissignalerne på elmarkedet kan eksempelvis mindskes gennem fastprisaftaler på el samt elkøbsaftaler (såkaldte PPA'er), hvis der ikke er mulighed for at byde ind i systemydelsesmarkederne.

Fraværet af et konkurrencepræget marked for PtX-brændstoffer kan mindske incitamentet til at reagere på markedssignaler på elmarkederne. I en situation, hvor der er få producenter og høj betalingsvillighed fra aftagerne, vil der forventeligt i højere grad produceres PtX-brændstoffer i perioder med høje elpriser.

Forpligtelser på aftagersiden om levering af PtX-brændstoffer kan betyde, at PtX-producenters mulighed for fleksibel drift reduceres, da de ellers ikke kan leve op til deres forpligtede afsætningsmængder. Det skyldes, at mange aftagere har behov for faste og hyppige leveringer af brændstoffer.

Regulering

National regulering og regulering fra EU kan have indflydelse på, hvordan PtX-operatørerne vil drifte deres PtX-anlæg og påvirke, hvor fleksibelt anlæggene vil opereres. Det gælder bl.a. regulering vedr. tarif- og netprodukter, samt markedsmodeller på brintmarkedet, der understøtter fleksibilitet i sammenhæng med elmarkedet.



Fleksibilitet fra PtX-anlæg

Indhold

Resumé.....	1
Fleksibilitet fra PtX-anlæg	3
Indledning.....	3
Opsamling af pointer fra aktørerne	4
Fleksibilitet fra PtX-anlæg	6
Tekniske muligheder	6
Teknisk produktionsdesign.....	8
Kommercielle aftaler med aftagere	11
Brintinfrastruktur og lagring	13
Regulering	14

Indledning

Power-to-X forventes at komme til at spille en stor rolle i det danske energisystem fremover. I *Analyseforudsætningerne til Energinet 2023 (AF23)* fremskrives elforbruget til PtX i 2040 at være mere end dobbelt så stort som det samlede danske elforbrug i dag. For at sikre et energisystem med en høj forsyningsikkerhed og en omkostningseffektiv udnyttelse af elnettet har fleksibelt elforbrug stor betydning. PtX-anlæg forventes at kunne agere som en fleksibel elforbruger, idet det er muligt at nedregulere elforbruget på anlægget i perioder, hvor der ellers ikke ville være tilstrækkelig med elproduktion til at dække det samlede elforbrug i Danmark. Omvendt vil PtX-anlæg kunne aftage en betydelig mængde elproduktion fra vind og sol i perioder med en højere elproduktion end det samlede elforbrug.

Der er derfor gennemført en analyse af fleksibilitet fra PtX-anlæg med fokus på de væsentligste faktorer, som påvirker fleksibiliteten fra PtX-anlæg:

- 1) Tekniske muligheder i PtX-anlæg
- 2) Teknisk produktionsdesign
- 3) Kommercielle aftaler med aftagere
- 4) Brintinfrastruktur og lagring
- 5) Regulering



I analysearbejdet er der gennemført 12 bilaterale møder med centrale aktører, der leverer PtX-teknologi, arbejder på at etablere PtX-anlæg, indgår PPA'er med PtX-udviklere samt PtX-rådgivere. Budskaberne i opsamlingsnotatet repræsenterer derfor kun input fra et udsnit af relevante PtX-aktører og -teknologier. Analysen har været i høring i PtX-taskforcens interessentforum og relevante bemærkninger er indarbejdet.

Opsamling af pointer fra aktørerne

Tekniske muligheder og udfordringer

- Elektrolyseanlæg kan regulere hurtigt op og ned og har gode muligheder for at deltage i systemydelsesmarkeder.
- Elektrolyseanlæggene kan opereres kontinuerligt ned til lastniveauer på mellem 5 og 20 pct. for hvert enkelt elektrolysemodul. Ved modulær opbygning af elektrolysekapacitet kan minimumslasten blive mindre end 1 pct. afhængig af antallet af moduler.
- Det er uvist, hvor meget fleksibel drift af elektrolyse (tænd og sluk, samt op- og nedregulering af elektrolyse) påvirker effektivitet og levetid for anlægget, hvilket kan have betydning for i hvor stor grad, PtX-operatører vil udnytte fleksibilitetsmulighederne.
- Der mangler erfaring med drift af PtX-teknologi i storskala. Det er derfor fortsat usikkerhed, hvor fleksible teknologierne kommer til at blive.
- De fleste viderekonverteringsanlæg forventes at kunne opereres fleksibelt. De forventes dog at være en smule mindre fleksible sammenlignet med elektrolyseanlæggene med minimumslaster ned til mellem 10 og 20 pct. Dog vil enkelte viderekonverteringsteknologier som fx Fischer-Tropsch, en proces som bruges til produktion af e-diesel og jetfuel mv., have begrænsede fleksibilitetsmuligheder med en minimumslast på ca. 40 og 50 pct. på grund af skrøbelige kemiske processer.

Teknisk produktionsdesign

- Generelt forventer udviklerne at optimere deres produktion af PtX-brændstoffer op imod elmarkedet, således at PtX-anlægget er i drift i perioder med lave elpriser og omvendt neddrøses eller lukkes i perioder med høje elpriser, hvor eventuelt egenproduceret strøm i stedet sælges ind i elmarkedet.
- PtX-udviklerne, der vil producere brint, forventer ikke at etablere eget brintlager, da de forventer at blive tilsluttet en brintinfrastruktur. Blandt udviklerne af projekter, der omhandler produktion af flydende PtX-brændstoffer, varierer planerne i større grad for så vidt angår etablering af lagerkapacitet. Her bemærker flere aktører, at de planlægger brintlagre med en kapacitet svarende til ca. 4-8 timers produktion i fuldlast, hvor én



aktør ikke planlægger med et brintlager. Flere aktører nævner, at de planlægger med en lagerkapacitet til ca. fire dages oplag af slutproduktet.

- PtX-udviklerne mangler viden og erfaring med drift af PtX-teknologi, hvilket kan have betydning for driften af anlæggene og udnyttelse af fleksibilitetsmulighederne.

Kommercielle aftaler

- Gennem de PPA'er, der er efterspurgt i dag, er der eksempler på, at det er muligt for PtX-operatører at sælge strømmen fra elkøbsaftaler i elmarkedet i perioder med høje elpriser i stedet for at bruge den selv. I de tilfælde er det dermed muligt for PtX-operatørerne at reagere på prissignaler fra elmarkedet og understøtte forsyningen af de aktuelle behov for ikke fleksibel elforsyning.
- Der udtrykkes interesse blandt en række PtX-udviklere i at engagere sig i markedet for systemydelser mhp. at øge indtjeningsmulighederne.
- Adspurgte eludbydere bemærker, at det er muligt at indgå elkøbsaftaler med mulighed for at byde ind i systemydelsesmarkeder, men oplever ikke efterspørgsel herfor blandt PtX-udviklerne.
- Det nævnes af flere PtX-udviklere, at de skal kunne levere brændstoffer på daglig til ugentlig basis til deres aftagere, og at det kan begrænse deres mulighed for at operere fleksibelt.
- Flere PtX-udviklere nævner, at de binder omkring 70-80 pct. af deres forventede produktion i faste kontrakter, hvilket kan reducere deres mulighed for at reagere fleksibelt på elmarkedet.
- En udvikler påpegede, at der blandt PtX-udviklere mangler erfaring i at udarbejde afsætningskontrakter på PtX-brændstoffer, og det kan betyde, at en stor andel af den forventede produktionsmængde afsattes gennem faste kontrakter, hvilket kan reducere muligheden for at producere fleksibelt.
- Gevinster fra systemydelser kendes ikke på forhånd, hvilket kan gøre det svært at regne med i en business case, og det kan betyde, at driften planlægges på en mindre fleksibel måde. Derudover kan gevinsterne ved at levere systemydelser mindskes, når flere aktører vil deltage i systemydelsesmarkederne, hvilket skaber større usikkerhed og gør det sværere at regne med i en business case.

Brintinfrastruktur og lagring

- Flere fremhæver, at de positive fleksibilitetsmuligheder fra en rørført brintinfrastruktur først finder sted, når denne er udviklet til et sammenhængende system med tilstrækkelig lagereffekt fra både linepacking og kavernelager, som kan skabe et flydende marked.
- Aktørerne nævner, at de regner med at have deres PtX-anlæg i drift mellem 5.000 og 7.500 fuldlasttimer. Flere aktører bemærker, at en brintinfrastruktur vil kunne reducere antallet af fuldlasttimer. Én aktør



nævner, at det vil kunne betyde en halvering af fuldlasttimerne. Denne forventning skyldes, at en brintinfrastruktur gør det muligt at adskille elektrolyse og viderekonverteringsanlæg og dermed kun at producere sin egen brint i perioder med lave elpriser og så købe brint fra et brintsystem i perioder, hvor elpriserne er høje.

Regulering

- Det understreges generelt, at det er vigtigt, at det er en gevinst for PtX-anlæg at være tilsluttet til det kollektive elnet, så elprisen bliver styrende for PtX-produktion både på TSO- og DSO-niveau, og dermed understøtter et fleksibelt elsystem.
- Der er generel interesse blandt projektudviklerne for tarifproduktet begrænset netadgang, men det understreges, at det er vigtigt med generel afklaring på tarifområdet, særligt fsva. begrænset netadgang (godkendt af Forsyningstilsynet d. 26. september 2023).
- En aktør påpegede, at en kapacitetsbestemt tarifmodel kan undersøges, ligesom krav om fleksibilitet kan undersøges.
- Det bemærkes generelt, at aktørerne ønsker at opfylde kriterier fra RFNBO, og at de forventer, at det kan blive en standard, som breder sig til andre sektorer end transportsektoren og eventuelt også uden for EU.

Fleksibilitet fra PtX-anlæg

I det følgende gennemgås de væsentlige budskaber fra de afholdte møder opdelt efter de fem hovedtemaer i analysen.

Tekniske muligheder

PtX-anlæg kan adskille sig fra hinanden på en række punkter fx i størrelse og slutprodukt. Et PtX-anlæg kan bestå udelukkende af elektrolyseanlæg til produktion af brint, men kan også omfatte viderekonverteringsanlæg, hvor brinten kan forædles til mere avancerede PtX-brændstoffer som fx ammoniak, metanol og jetfuel. Størstedelen af energiforbruget i et PtX-anlæg vurderes at ske i elektrolyseanlægget, og derfor er elektrolyseprocessen særlig interessant med henblik på undersøgelse af fleksibilitetsmuligheder og påvirkningen på tilgængeligheden af strøm i elnettet (effekttilstrækkelighed).

Elektrolyseanlæg

Følgende afsnit er udarbejdet på baggrund af input fra møder med tre teknologileverandører af elektrolyseteknologier, som omfatter *alkaline electrolysis cell (AEC)*, *polymer electrolyte membrane (PEM)* og *solide oxide electrolysis cell (SOEC)*.

Niveauet for elektrolyseteknologiernes minimumlast ved kontinuerlig drift varierer mellem 5 og 20 pct. afhængig af teknologi. Det er muligt at komme længere ned



end minimumsniveauet ved kortvarig last. Drift omkring minimumslasten kan dog medføre ekstra slitage og påvirke levetiden på stakkene i elektrolyseanlægget. Opbygges elektrolysekapacitet modulært, hvor nogle af elektrolysemodulerne kan slukkes, er det muligt at opnå en lavere minimumslast for det samlede elektrolyseanlæg. Det betyder, at jo flere elektrolysemoduler der er sammensat, jo længere ned i last er det muligt at komme. Hvis der eksempelvis etableres 10 elektrolysemoduler med en minimumslast på 20 pct., vil minimumslasten for de 10 elektrolysemoduler som samlet anlæg kunne komme ned på 2 pct., hvis ni moduler slukkes og ét model driftes ved minimumslasten på 20 pct.

Det forventes, at anlæggene primært vil blive opbygget med en modulær opbygning, som man kender fra solcelleparker. Det bemærkes af en teknologileverandør, at drift, hvor anlægget tændes og slukkes helt, går hårdere ud over levetiden sammenlignet med op- og nedregulering mellem minimallast og fuldlast. Dette vil gælde for slukning af både enkelte moduler og hele anlægget. Dette er et område, hvor teknologileverandørerne mangler viden og erfaring og endnu ikke har data på omkostninger og konsekvenser i forhold til levetid. Det bemærkes af en teknologileverandør, at erfaringer med levetid ikke kan forceres, da resultaterne først kommer, når anlæggene har været i drift i den forventede levetid.

Reguleringshastigheden for elektrolyseteknologierne har betydning for, i hvilket omfang det er muligt for PtX-operatørerne at byde ind i systemydelsesmarkederne. Generelt har alle elektrolyseteknologierne gode muligheder for at regulere op og ned og dermed deltage i systemydelsesmarkeder. Elektrolyseteknologierne kan alle lukkes eller reguleres ned på et lavt lastniveau på få sekunder. I forhold til at regulere et elektrolyseanlæg op fra 0-100 pct. last afhænger hastigheden af om anlægget er i drift, varm standby eller anlægget er koldt. I en situation hvor anlægget er i drift, vil elektrolyseteknologierne kunne reguleres op fra et lavt niveau, fx fra 0-100 på ca. mellem 10 sekunder og 2-3 minutter afhængig af teknologi. Hvis elektrolyseteknologierne er i varm standby, tager det mellem ca. 1 minut for et par af teknologierne og 30 minutter for en af teknologierne. Når elektrolyseanlæggene startes kolde, varierer opstartshastigheden mere og ligger på hhv. ca. 1 minut, 30-40 minutter og 6-7 timer.

Virkningsgraden for elektrolyse kan variere afhængig af hvilket lastpunkt, der opereres med. En teknologileverandør bemærker, at virkningsgraden for deres anlæg er højest ved et lastniveau på 65 pct. af nominel kapacitet med en virkningsgrad, der er 2-3 pct.-point bedre end yderpunkterne i intervallet fra 50-100 pct.

Ovenstående pointer betyder, at selvom det er muligt at nedregulere elektrolyseanlægget til minimumslasten, kan forhold som virkningsgrad, slitage og



levetid have betydning for, hvordan elektrolyseanlæggene i praksis vil blive opereret.

Viderekonverteringsanlæg

Afsnittet om viderekonverteringsanlæg omfatter teknologier til produktion af metan, ammoniak, metanol og jetfuel gennem PtX-teknologi. Minimumslasten for viderekonverteringsanlæg varierer afhængig af anlæg.

Det bemærkes af en PtX-aktør, at produktionen af e-metan via trickle-bed reaktor i forbindelse med biogas vil kunne opereres med samme fleksibilitet som elektrolyse. Stoppes produktionen af e-metan, vil biogassen kunne føres videre til et opgraderingsanlæg, hvor CO₂'en adskilles fra metanen. Produktionen af e-metan vil kunne opstartes inden for en halv time ved koldt anlæg.

Teknologileverandøren af viderekonverteringsanlæg til ammoniak og metanol nævner, at anlæggene vil kunne komme ned på omkring 10 pct. elforbrug af nominal kapacitet. Leverandøren vurderer, at drift i lavlast har konsekvenser for effektiviteten, og at mange koldstarter kan reducere levetiden, da stål og keramisk materiale har bedst af konstant varme. Disse viderekonverteringsanlæg kan reguleres op og ned med ca. 3 pct. af samlet kapacitet pr minut.

Viderekonverteringsanlæg til produktion af jetfuel er i nedenstående baseret på Fischer-Tropsch-teknologi, der er en kendt teknologi, som kan anvendes til produktion af e-diesel, jetfuel mv. Det bemærkes af en PtX-aktør, der udvikler et PtX-projekt med Fischer-Tropsch-teknologi, at disse anlæg vil kunne opereres med en minimumslast af elforbruget på ca. 40-50 pct. af nominal kapacitet. Nedlukning (start og stop) af disse typer anlæg kan udfordre de kemiske processer og derfor også kvaliteten på PtX-produkterne. Der arbejdes dog på at udvikle Fischer-Tropsch-anlæg, som kan operere mere fleksibelt. Der udvikles også på andre fleksible teknologier til produktion af jetfuel bl.a. gennem forædling af metanol.

Det bemærkes blandt flere PtX-aktører, at der generelt mangler udvikling og erfaring med fleksibel drift af viderekonverteringsanlæg i storskala.

Teknisk produktionsdesign

PtX-udviklerne planlægger generelt deres produktion med muligheden for at kunne nedregulere deres PtX-produktion i perioder med høje elpriser og sælge strømmen til elmarkedet i stedet. Prisniveauet for, hvornår PtX-operatøren vil nedregulere PtX-produktionen og sælge strøm til elmarkedet, afhænger som udgangspunkt af, hvor der er størst indtjeningsmulighed. Dette afhænger af det konkrete projekt og herunder både tekniske og kommercielle forhold, som beskrives nærmere nedenfor.



Elinput

PtX-udviklerne bemærker generelt, at der er en værdi i at kunne kontrollere og optimere udnyttelse af strøm gennem hhv. salg til elmarkedet og anvendelse i PtX-anlæg. De har derfor en generel interesse i at udnytte egne VE-kilder til produktion af PtX. Det bemærkes ligeledes af flere aktører, at der er fordele ved at forbinde egne VE-kilder gennem direkte linjer bl.a. for at kunne opfylde krav i EU-forordningen om dokumentation af grøn brint (RFNBO) og en forventning om en lavere tariffbetaling. Det er dog ikke alle udviklerne, der har egne VE-anlæg til rådighed. I de tilfælde nævner nogle aktører, at de vil anskaffe strømmen gennem PPA'er eller engagere sig i udvikling af VE-anlæg i egne projekter for bedre at kunne udnytte gevinsterne ved fleksibilitet mellem VE-produktion og elektrolyse.

Generelt ser udviklerne elinput fra både sol og vind som et godt miks, men det bemærkes, at et PtX-anlæg vil kunne profitere af en større andel af VE fra vind. Dette skyldes, at elproduktion fra vind giver en produktionsprofil, som minder mere om grundlast og giver en mere stabil bundproduktion af el, som kan forsyne et elektrolyseanlæg direkte. Dimensioneringsforhold gennem VE- og elektrolysekapacitet kan optimeres, men der vil skulle tages højde for tekniske, økonomiske og regulatoriske parametre.

Onsite mellemlager

Lagerkapacitet giver mulighed for at have en mere fleksibel PtX-produktion. Et brintlager kan eksempelvis eliminere eller reducere behovet for at operere elektrolyse- og viderekonverteringsanlæg synkront. Lagerkapacitet muliggør dermed produktion af brint til lageret, når elpriserne er lave og neddrose brintproduktionen, når elpriserne er høje og i stedet trække brint fra lageret. Denne lagermulighed kan fx komme gennem et tanklager ved PtX-anlægget eller gennem tilslutning til en sammenhængende rørført brintinfrastruktur med tilhørende lagerkapacitet.

PtX-aktørerne udtrykker forskellige planer for etablering af lagerkapacitet til PtX-brændstof blandt deres PtX-projekter. Overordnet er producenterne uden viderekonverteringsanlæg afhængige af en brintinfrastruktur og planlægger ikke med onsite brintoplæg. Brintproduktionsprojekter, der idriftsættes før der er etableret en brintinfrastruktur, vil være afhængig af mellemlager til brint i forbindelse med vejtransport af brint i lastbiler eller skibe. Ved produktion af e-metan udtrykkes ikke behov for brintlager, da produktionen er fleksibel, og metanen kan afsættes direkte i gasnettet.

I projekterne, der omhandler produktion af flydende PtX-brændstoffer, er der flere eksempler på, at udviklerne planlægger med både brintlager og lager til slutproduktet. To aktører nævner, at kapaciteten på brintlageret svarer ca. 4-8 timers produktion i fuldlast. Flere aktører nævner, at de planlægger med en lagerkapacitet til fire dages oplæg af slutproduktet. Der blev dog også nævnt et



eksempel på produktion med viderekonvertering uden brintlager, hvor elektrolysen og viderekonverteringsanlægget designs til at være i drift synkront, hvilket overflødig gør behov for brintlager.

Opmagasinerings af CO₂

Producenter af flydende kulstofholdige PtX-brændstoffer planlægger med mulighed for at opmagasinere CO₂ on site eller på omkringliggende arealer. En af aktørerne nævner, at de planlægger en lagerkapacitet svarende til tre dages produktion. Overordnet mener aktørerne ikke, at forsyning af CO₂ kommer til at have indflydelse på anlæggets fleksibilitet.

Batterier

En af PtX-aktørerne planlægger etablering af batterikapacitet med henblik på stabilisering af anlægget og sikre en skånsom nedlukning af anlægget samt indtjening gennem systemydelse. Konkret nævnes en kapacitet på 5-10 MWh, der svarer til ca. 2-4 pct. af elinputtet til elektrolysen, men de overvejer at øge kapaciteten 2-3 gange. Andre aktører udtrykker interesse for batterikapacitet med henblik på at levere systemydelse.

Fulldlasttimer

Blandt PtX-aktørerne er der forskellige forventninger til antallet af fulldlasttimer afhængigt af typen af anlæg. De forventer, at antallet af fulldlasttimer vil ligge mellem 5.000 og 7.500 timer i forbindelse med deres første PtX-projekter. Blandt producenterne af brint er der særligt stor forskel på antallet af fulldlasttimer mellem 5.000 og 7.000 timer. Ved projekter med viderekonverteringsanlæg af brint er der forventning fra producenterne om ca. 5.500-6.500 timer. En rådgiver bemærker, at de forventer, at brintproducenter og anlæg med viderekonvertering vil ligge på hhv. 5.000-6.000 og 6.500-7.500 fulldlasttimer.

En strømleverandør bemærker, at det ifølge dem ikke er muligt at forsyne PtX-anlæg med så mange fulldlasttimer, hvis der sker en stor udvikling af PtX i Danmark, fordi der ikke vil være tilstrækkelig billig strøm.

Elprisen udgør det største omkostningselement i produktion af brint, og flere aktører forventer derfor, at brintprisen vil optimeres ved kun at producere brint på baggrund af de billigste elpriser og dermed få færre driftstimer. En aktør kan dog også forestille sig, at anlæggene på længere sigt og ved en større afdækning i markedet vil køre med færre fulldlasttimer end 5.000 med henblik på at sikre indtjening via systemydelse. En opkobling til en sammenhængende brintinfrastruktur vil også kunne have betydning for, at fulldlasttimerne kan reduceres (se i afsnittet Brintinfrastruktur og -lagring).



Kommercielle aftaler med aftagere

Udover tekniske muligheder og valg af teknisk produktionsdesign kan kommercielle aftaler som fx elkøbsaftaler, systemydelse og offtake-kontrakter have indflydelse på, hvordan PtX-operatørerne faktisk vil drifte deres PtX-anlæg.

Systemydelse

Der udtrykkes interesse blandt en række PtX-udviklere for at engagere sig i markedet for systemydelse med henblik på at øge indtjeningsmulighederne.

Det bemærkes blandt udviklere, at det kan have interesse, eller at der planlægges efter at etablere batterikapacitet i forbindelse med deres PtX-projekter til både at balancere PtX-anlægget og med henblik på indtjening gennem systemydelse. En el-udbyder udtrykker interesse for og undersøger muligheden for at investere i batterikapacitet på mellem 10 og 100 MW for at spille ind i systemydelsesmarkedet.

Det bemærkes af en PtX-udvikler, at det er vigtigt, at PtX-aktørerne indgår tovejsaftaler på opkoblingen til det kollektive net, så det er muligt både at levere systemydelse, balancere nettet og tilbagesælge strøm til markedet.

Det påpeges, at systemydelsesmarkedet har interesse, men det er svært at anskueliggøre værdien og indregne i en business case, hvilket de vurderer er nødvendigt, når der er tale om project finance løsninger. Project finance betyder, at investorer vil have sikkerhed for værdien på forhånd og kende cash flow på både udgifter og indtægter i de første 15 år. Derudover nævnes, at der er risiko for, at indtjeningsmulighederne på systemydelsesmarkedet vil reduceres over tid, hvis andre PtX-projekter også vil byde ind i markedet, så gevinsterne skal deles mellem flere aktører. Ovenstående udfordringer kan derfor påvirke måden, en udvikler vil operere sit anlæg, hvilket medfører et tab af teoretisk økonomisk potentiale.

PPA'er

PPA'er indgås som bilaterale aftaler mellem VE-ejer og elforbrugeren, som i denne sammenhæng er PtX-udvikleren. På trods af at der er tale om bilaterale aftaler med mulighed for varierende indhold, er der nogle overordnede tilgange til disse aftaler.

Pay-as-Produced er en klassisk model, der kan leveres som baseload-kontrakter. Det bemærkes af en el-udbyder og en rådgiver, at baseload-kontrakter generelt foretrækkes af PtX-udviklerne, da det er muligt at opnå et højere antal fuldlasttimer på deres PtX-anlæg, særligt hvis der indgår baseload-kontrakter med VE fra både sol og vind. Den samme el-udbyder bemærkede, at det gennem disse PPA'er vil være muligt for PtX-udviklerne at sælge strøm til nettet, hvis det har større værdi at sælge strømmen fremfor at bruge den til PtX.



Pay-as-forecasted er en type kontrakter, hvor der sammenlignet med *Pay-as-Produced*, indarbejdes større samtidighed og giver bedre mulighed for at optimere og indtænke day-ahead markedet og intraday markedet, samt systemydelse. Den interviewede el-udbyder foretrækker denne type aftaler, men bemærker at det på nuværende tidspunkt ikke er efterspurgt blandt PtX-udviklere. Samme eludbyder nævner, at denne type PPA dog kan komme til at spille en rolle, hvis markedet for PtX-produkter bliver mere konkurrencepræget.

Der er eksempler på, at PPA-kontrakter indgås simultant med afsætningskontrakter på PtX-brændstoffer, og det i større grad er aftagernes risikoprofiler, der er bestemmende for, hvor meget fleksibilitet, der kan indeholdes i PPA-aftalerne. Før energikrisen bemærkes, at der var større interesse for variabel PtX-produktion med lavere priser, hvor efterspørgslen efter energikrisen i større grad omhandler fastprisaftaler. Aftalerne vil sandsynligvis være afhængige af elprisudviklingen og indarbejde opt-out-muligheder eller risikodeling mellem aftaleparterne.

PPA'er bliver typisk indgået med en vis længde på ca. 10 år for at sikre "bankability", dvs. at sikre, at banklån eller andre kreditter kan optages under finansieringen af anlægget.

Offtake kontrakter

PtX-producenter indgår afsætningskontrakter for PtX-brændstoffer for at sikre afsætning af deres brændstoffer. Afhængig af hvordan kontrakterne er sammensat, kan de påvirke producenternes mulighed for at have en fleksibel PtX-produktion. Herudover kan det være forskelligt, hvor stor en del af den forventede produktionsmængde, producenterne afsætter gennem faste kontrakter, og hvor mange aftagere der bliver indgået aftaler med i et givent PtX-anlæg.

Generelt bemærkes blandt PtX-udviklerne, at aftagerne af PtX-brændstoffer kan have faste leverancer, så deres forsyning af brændstoffer stemmer overens med deres forbrug. Det nævnes af flere udviklere, at de skal kunne levere brændstoffer på daglig til ugentlig basis. Det vil alt andet lige påvirke, hvor mange timer PtX-producenten har mulighed for at nedregulere eller stoppe produktionen af slutproduktet i perioder med høje elpriser. Det afhænger dog af flere faktorer, som fx hvor stor lagerkapacitet udviklerne har til rådighed, og hvorvidt der er tilslutning til et flydende marked gennem fx en rørført brininfrastruktur (se afsnittet *Brintinfrastruktur og lagring*). Herudover påvirkes muligheden for fleksibel drift af hvor stor en andel af udviklernes produktion, der er bundet gennem faste kontrakter.

Blandt udviklerne varierer det hvor stor en andel af deres forventede produktion, de afsætter gennem faste aftaler. Det bemærkes, at det generelt er risikabelt at binde for stor en mængde af sin forventede produktion til faste kontrakter. Det skyldes, at der kan forekomme driftsudfordringer, og det kan reducere muligheden for at



operere fleksibelt. Flere udviklere nævner, at de binder omkring 70-80 pct. af deres produktion i faste kontrakter.

Det bemærkes fra en udvikler, at de ikke har erfaring med at indgå off-take kontrakter, og at de fremadrettet vil lave kontrakter, som i større grad giver mulighed for at operere fleksibelt (det er uvist, hvor stor en andel denne udvikler har bundet sig til gennem faste kontrakter).

Brintinfrastruktur og lagring

Generelt er der stor interesse for tilslutning til en rørført brintinfrastruktur. Nogle projektudviklere angiver, at de er afhængige af en rørført brintinfrastruktur, mens andre ikke vil være afhængige af en brintinfrastruktur men dog forventer, at tilslutning til en brintinfrastruktur vil forbedre muligheden for at operere PtX-anlægget fleksibelt og forbedre indtjeningsmuligheder i projekterne.

PtX-aktørerne nævner, at en sammenhængende rørført brintinfrastruktur vil reducere antallet af fuldlasttimer på elektrolyseanlæggene i de timer, hvor elpriserne er højest. Én af aktørerne forventer at reducere antallet af fuldlasttimer med 50 pct., hvis de får adgang til en sammenhængende rørført brintinfrastruktur. Denne forventning skyldes, at en brintinfrastruktur gør det muligt at adskille brintproduktion og viderekonvertering af brint og dermed kun producere sin egen brint i perioder med lave elpriser, og omvendt købe brint fra et brintsystem i perioder, hvor elpriserne er høje, og omkostningerne til egenproduktion af brint vil overstige brintprisen fra et brintsystem.

Herudover nævnes det, at den forventede lagereffekt fra en brintinfrastruktur, med tilslutning til lager og evt. linepacking, kan reducere eller eliminere behov for andre lagerfaciliteter on-site, som brintlager og lagring af flydende PtX-brændstoffer.

Det bemærkes dog fra aktører, at de positive effekter fra en brintinfrastruktur først finder sted, når denne er udviklet til et sammenhængende system med tilstrækkelig lagereffekt, som kan skabe et konkurrencedygtigt marked. Det nævnes som eksempel, at fleksibilitetsmulighederne i en brintinfrastruktur vil være mindre, hvis der blot etableres et rør, som forbinder en producent og en aftager uden tilslutning til rørsystem med lager eller lagereffekt fra linepacking.

Det bemærkes ligeledes af PtX-aktørerne, at det er afgørende med afklaring om rammerne for brintinfrastruktur. Det nævnes konkret, at det skal afklares, hvor og hvornår der vil være adgang til brintinfrastruktur, samt hvad det vil koste at benytte infrastrukturen. Uklarhed over brintinfrastruktur kan risikere at forsinke PtX-projekter eller føre til, at udviklerne designer deres produktionsanlæg under antagelse af, at der ikke kommer brintinfrastruktur.



E-metan til gassystemet

Produktion af e-metan adskiller sig fra PtX-brændstoffer, som er produceret gennem viderekonverteringsanlæg, fordi e-metan er en gas, og der er en eksisterende rørført infrastruktur til e-metan. E-metan har som udgangspunkt tilstrækkelig kvalitet til at kunne injiceres i gassystemet. Produces e-metan med tilslutning til gassystemet vil der være fri mulighed for at regulere produktionen af e-metan op og ned, samt stoppe produktionen helt. De konkrete vilkår bestemmes dog i nettilslutningsaftalen mellem systemoperatøren og projektudvikleren. Der arbejdes på rammerne for at kunne injicere e-metan i gassystemet.

Regulering

National regulering og regulering fra EU kan have indflydelse på, hvordan PtX-operatørerne vil drifte deres PtX-anlæg og påvirke, hvor fleksibelt anlæggene vil opereres.

National regulering.

Flere PtX-aktører understreger, at det er vigtigt, at PtX-anlæg tilsluttes til det kollektive elnet på en måde så det er en gevinst for energisystemet, og at markedssignalerne på elprisen er tydelige, så elprisen bliver styrende for PtX-produktion både på TSO- og DSO-niveau. Herudover bør tarifmodeller udarbejdes, så de er stabile og forudsigelige.

Flere aktører udtrykte endvidere interesse for kommende tarif- og netprodukter, som bl.a. begrænset netadgang. De understregede vigtigheden af klarhed for, hvorvidt tarifprodukterne vil blive godkendt. I forbindelse med tarifproduktet begrænset netadgang bemærkede en aktør, at det er vigtigt at tarifproduktet giver mulighed for at opretholde minimumsfunktioner. Det tilføjes, at den nedre grænse er på 2 pct., men bør være højere for at tilgodese alle elektrolyseteknologierne. Det bemærkes også af aktører, at det er vigtigt, at flere tarifprodukter kan anvendes i samme projekt.

Forsyningstilsynet har den 26. september 2023 godkendt Energinets nye model for begrænset netadgang for forbrugsanlæg i transmissionsnettet. Energinet undersøger muligheden for at videreudvikle metoden, således at elkunder fremadrettet kan blande/stable nettilslutningsprodukter. Det vil muliggøre, at den enkelte elkunde kan vælge at have fuld netadgang for fx de første 20 pct. af sin tilsluttede kapacitet og begrænset netadgang for resten. Et sådant stabilt netprodukt forventes at være et attraktivt produkt for mange store elkunder og vil samtidig give en bedre udnyttelse af netkapaciteten i forhold til tilslutning med fuld netadgang.

Ift. fremadrettet arbejde nævnte en aktør, at muligheden for at stille krav om fleksibilitet bør undersøges fx gennem en kapacitetsbestemt tarifmodel, hvor man



indgår længere kapacitetskontrakter med aktører, som har fleksibel kapacitet til rådighed.

RFNBO

PtX-aktørerne udtrykker generelt at ville opfylde de krav, der stilles til produktionen af vedvarende flydende og gasformige brændstoffer af ikke-biologisk oprindelse (RFNBO), da det vil have en markedsæssig værdi at kunne betegne sine brændstoffer som grønne, pga. tilskudsordninger, og da det sandsynligvis vil blive et krav fra markedet om at efterleve standarden. Det bemærkes, at krav om RFNBO kan blive en standard, som breder sig til andre sektorer end transportsektoren og eventuelt også uden for EU.

Flere aktører fremhæver, at kriterierne om tidsmæssig sammenhæng kan være en udfordring og indskrænke udviklernes muligheder for at opfylde kriterierne for RFNBOs. Denne udfordring bemærkes særligt af en PtX-udvikler med VE-kilder på land, hvor der er færre fuldlasttimer sammenlignet med havvind.

Flere aktører nævner endvidere, at det er vigtigt, at strøm produceret pba. biomasse ikke udgår af beregningen af VE-andele, da det ellers bliver mere vanskeligt at opfylde RFNBO-kravene. En aktør nævner, at kunder muligvis vil efterspørge skærpede krav i forhold til kriterierne for RFNBO. Som eksempel nævner en aktør, at øgede krav kunne være, at der udelukkende må produceres brint pba. sol og vind og ikke biomasse.