

Aalborg Universitet



Handlingsplan for storskala anvendelse af elektrolyse i Danmark

Skov, Iva Ridjan; Mathiesen, Brian Vad

Publication date:
2018

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Skov, I. R., & Mathiesen, B. V. (2018). *Handlingsplan for storskala anvendelse af elektrolyse i Danmark.*

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



HANDLINGSPLAN FOR STORSKALA ANVENDELSE AF ELEKTROLYSE I DANMARK



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

**Handlingsplan for storskala anvendelse
af elektrolyse i Danmark**

Oktober, 2018

© Forfatterne

Aalborg Universitet,
Institut for planlægning

Iva Ridjan Skov
Brian Vad Mathiesen

Aalborg Universitet
Institut for planlægning

Udgiver:

Institut for planlægning
Aalborg Universitet
Vestre Havnepromenade 5
9000 Aalborg
Danmark

ISBN 978-87-93541-03-0

www.smartenergysystems.eu

Abstract

Elektrolyse af vand er en kemisk proces, som er blevet anvendt til industrielle formål i mange år. Interessen for brug af elektrolyse i energisektoren er stor, men udrulningen er kompleks og går for langsomt. Dette skal ændres inden for en overskuelig fremtid, både fordi behovet for brint til den tunge transport er stor, og fordi lagring af elektricitet ved hjælp af brint kan give os mulighed for at bruge mere fluktuerende vedvarende energi i systemet. Lagring af elektroner i kemisk energi via elektrolyse udgør et alternativ til direkte lagring af elektricitet eller varmelagring.

Danmark bør allerede nu påbegynde implementeringen af elektrolyse i energisystemet i mindre skala. Herved kan målsætningen om 100% vedvarende energi i 2050 blive realiseret, hvor der kan være brug for flere hundrede MW elektrolyse, hvis man følger mange af de scenarier der er lavet for 2050. I disse anses elektrolyse nemlig for at være en vigtig del af det fremtidige energisystem.

Denne handlingsplan er inddelt i fire dele og er baseret på interessentinput, tidligere analyser og litteraturstudier. Handlingsplanen præsenterer en liste over aktiviteter og tiltag, som kan iværksættes for at fremskynde implementeringen af elektrolyseanlæg. Danmark har en unik mulighed for at blive en central aktør inden for elektrolyse og produktion af elektrofuels, da Danmark med sin høje andel af vedvarende energikilder kan fungere som testcenter for integration af vedvarende energi og integrationsteknologier, samt som producent af brændsler til den tunge transport.

Forord

Udarbejdelsen af denne rapport er et resultat af et samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Institut for Energikonvertering og –lagring og Topsoe Fuel Cell A/S i forbindelse med forskningsprojektet ForskEL – Mod fast oxid elektrolyseanlæg i 2020 (2015-1-12276).

Forfatterne vil gerne takke de interviewede interessenter, der med deres ekspertviden har bidraget til at tilvejebringe viden om den nuværende status på elektrolyse i Danmark. Interessenternes deltagelse i interview til dette arbejde er ikke nødvendigvis udtryk for, at de er enige i alle anbefalingerne i denne handlingsplan. Alle deres bidrag har imidlertid været uundværlige. Følgende har ydet et bidrag til denne rapport:

- Allan Schrøder Pedersen, Danmarks Tekniske Universitet
- Peter Vang Henriksen, Danmarks Tekniske Universitet
- Lasse Røngaard Clausen, Danmarks Tekniske Universitet
- Poul Erik Morthorst, Danmarks Tekniske Universitet og Klimarådet
- Birgitte Bak-Jensen, Aalborg Universitet
- Mads Pagh Nielsen, Aalborg Universitet
- Lotte Holmberg Rasmussen, NEAS
- Anders Bavnhøj Hansen, Energinet.dk
- Louis Sentis, Airliquid
- Søren Lyng Ebbenhøj, Energistyrelsen
- Steen Børsting Petersen, Hydrogen Valley
- Hans Jørgen Brodersen, Hydrogen Valley
- Camilo Lopez Tobar, Electrochaea

Aalborg Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Airliquid, Electrochaea og Hydrogen Valley er med i Partnerskabet for brint og brændselsceller.

Forfatterne vil også gerne sige tak til Henrik Lund, Louise Krog Jensen og Søren Knudsen Kær fra Aalborg Universitet, John Bøgild Hansen fra Haldor Topsoe og Per Alex Sørensen fra PlanEnergi for deres kommentarer til rapporten.

Denne rapport er oversat fra den originale engelske version udgivet i marts 2017 [1] af Joe Jensen og Uni Reinert Petersen.

Indholdsfortegnelse

| | |
|--|----|
| Forord | i |
| Terminologi..... | v |
| Sammendrag..... | 1 |
| 1 Handlingsplan for implementering af elektrolyse i det danske energisystem | 5 |
| 1.1 Overblik over teknologierne og deres udviklingsstadie | 7 |
| 1.2 Fase 1: Markedsmodning – fra nu til 2020 | 10 |
| 1.3 Fase 2: Markedsoptag – fra 2020 til 2025 | 16 |
| 1.4 Fase 3 og 4: Markedsgennembrud – fra 2025 til 2035 og storskala udrulning i det smarte energisystem – fra 2035 og frem. | 18 |
| 2 Den teknologiske status samt potentielle anvendelsesformål..... | 20 |
| 3 Interessenters vision for elektrolyse | 25 |
| 4 Energisystemer og elektrolyse: fremskrivninger mod 2020 og 2050. | 28 |
| 5 Perspektivering | 33 |
| 6 Referencer | 35 |

Terminologi

| Forkortelse | Betydning |
|--------------------|--|
| AEM | Anionbyttermembran |
| DME | Dimethyl ether |
| DSO | Distributionssystemoperatør |
| PEM | Polymerombytningsmembran |
| P2G | El-til-gas (Power to gas) |
| P2L | El-til-flydende brændsel (Power to liquid) |
| SOEC | Fastoxid elektrolyseceller |
| TRL | Teknologisk parathedsniveau |
| TSO | Transmissionssystemoperatør |

Sammendrag

Elektrolyse af vand er en veletableret elektrokemisk proces, der har eksisteret i mere end 200 år [2]. Selvom teknologi baseret på denne proces har været anvendt for industrielle formål siden begyndelsen af det 20. århundrede, har udrulningen af teknologien til energiformål dog aldrig været af en nævneværdig størrelse. Kun 4% af den globale mængde brint er produceret fra elektrolyse [3], mens det meste brint kommer fra en omdannelse af naturgas. Mange fremskrivninger og scenarier for det fremtidige energisystem, både danske og internationale, anser elektrolyse som en vigtig teknologi for omstillingen af vores energisystem mod en mere bæredygtig og klimavenlig fremtid [4–6]. Med det politiske fokus på at tilskynde omdannelsen af energisystemerne mod højere andele af vedvarende energi er det afgørende at forbinde el systemet med alle sektorer og lagringsmuligheder.

Globalt er de nuværende energisystemer stærkt afhængige af fossile brændsler. Imidlertid er det også disse brændsler, der er den primære kilde til fleksibilitet i systemet. Vedvarende energisystemer er derimod typisk baseret på en høj andel af fluktuerende elektricitet. Derfor er det nødvendigt at skabe fleksibilitet i energisystemet med fleksible teknologier, der kan starte og stoppe efter behov, for at sikre et velfungerende og robust system. Elektrolyse gør det muligt at omdanne elektroner fra vind og sol energi til lagringseget kemisk energi, og er på den måde med til at balancere systemet og øge dets fleksibilitet. Derfor bør elektrolyse anses som en vigtig teknologi i realiseringen af målsætningen om et 100% vedvarende energisystem, hvor med en bæredygtig anvendelse af biomasse.

Lagring af elektricitet i form af flydende eller gasholdige brændsler, hvori elektrolyse er en central del, kan også udgøre et bæredygtigt, vedvarende alternativ til fossilt transportbrændsel. På nuværende tidspunkt er mange alternativer til fossil energi i transportsektoren forbundet med et stort behov for biomasse, med undtagelse af brugen af el- eller batteridrevne køretøjer. Da elektrificering ikke er muligt for alle transportformer, er der en stor andel af transportbehovet, såsom tung- og langdistance transport, marintransport og luftfart, der skal dækkes af vedvarende brændsler i flydende eller gasholdig form. Hvis dette transportbehov udelukkende skal mødes med biomasse-baserede brændsler, vil det medføre, at enorme landområder i Europa og på verdensplan skal anvendes til at producere brændsler til transportformål. En sådan situation vil efterlade mindre areal til fødevarerproduktion og biomasse til andre sektorer, og trods det er det tvivlsomt, om det samlede globale transportbehov vil kunne blive dækket på denne måde.

Biomasseressourcerne er begrænsede og omfanget af det fulde biomassepotentiale er forbundet med stor usikkerhed. Opgørelser viser et potentiale på alt mellem 0 og 1500 EJ [7]. Hvis der dertil tilføjes kriterier om bæredygtig produktion og forbrug af biomasse, hvilket er essentielt for at begrænse miljøpåvirkningen og fødevarerforbruget globalt, samt for at sikre biodiversitet, så synes behovet for andre brændstoffer til transporten helt afgørende. I Danmark varierer biomassepotentialet fra kilde til kilde [4], men det synes klart, at potentialet ikke er nok til at møde det energibehov, som i dag bliver mødt af fossile brændsler i energisystemet – hverken i Danmark eller globalt. Det er derfor vigtigt at finde alternativer til biomasse, der kan møde de slutbehov, der er i særligt den tunge transport og industrien i energisystemet.

Behovet for at bruge elektrolyse til energiformål er så småt ved at vise sig, og visse teknologier har haft en signifikant fremgang i de senere år i forskellige lande i Europa. Demonstrationsprojekter verden over har

undersøgt og vist elektrolyseanlægs evne til at integrere vedvarende energi samt deres egenskaber til at producere forskellige brændsler gennem El-til-gas processer¹ (P2G) og opgradering af biogas med brint.

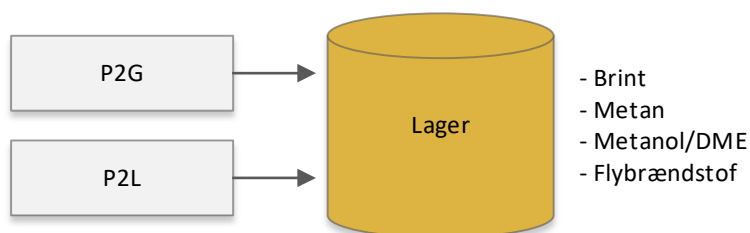
I 2013 var der ifølge [8] globalt:

- 41 realiserede MW størrelse P2G anlæg
- 7 planlagte MW størrelse P2G projekter.

Tyskland ligger i spidsen i forhold til afprøvning af teknologien i stor skala og i sammenhæng med vedvarende energisystemer. Med hensyn til el-til-flydende brændsel² (P2L) er der færre projekter og de fleste af dem er blevet realiseret i løbet af de senere år [9–11]. Her kan nævnes to realiserede P2L anlæg og to planlagte P2L projekter:

- George Olah anlægget på Island, som producerer metanol fra CO₂ og brint fra alkalisk elektrolyse,
- Et pilotanlæg i Dresden, Tyskland, som producerer diesel fra CO₂ og brint fra fast oxid elektrolyseanlæg,
- Luleå, Sverige, et stålværk som omdanner CO₂ til flydende brændsel.
- Duisburg / Lünen, Tyskland, hvor CO₂ fra et kulkraftværk og brint bliver omdannet til metanol.

Figur 1 viser hvilke brændsler, der kan produceres med P2G og P2L teknologier og som bidrager med en forbindelse mellem el systemet og energilagring i brændsler.



Figur 1. Lagring af elektricitet via elektrolyse med forskellige typer brændsler

Allerede nu bliver elektrolyse brugt til diverse funktioner i forskellige markeder, og på den korte bane er det mest sandsynligt at anvendelse af brint vil sprede sig til industrielle formål, niche-gasmarkeder, gas til små støttefunktioner og produktion af brint som transportbrændsel. Industriel brug af brint fra elektrolyse er ikke et nyt fænomen og brint har været anvendt til produktion af kunstgødning i lande, som har meget billigt el i årevis. Brugen af elektrolyse på niche markeder vil vokse, men sammenlignet med andre anvendelser vil behovet for kapacitet være lavt.

Brint bliver mere og mere attraktivt for det nuværende energisystem, i takt med at andelen af vedvarende energi stiger. Direkte anvendelse af brint i transporten via brændselsceller er i konkurrence med elektrificering i persontransporten, og i den tunge transport derimod er konkurrenten snarere biobrændsler, når det handler

Fremtiden for elektrolyse synes at være i transportsektoren ved el-til-metan og el-til-flydende brændsel processer, som muliggør fleksibilitet og integration på tværs af sektorer i kombination med sæsonbestemt lagring.

(www.smartenergysystems.eu).

¹ Bliver typisk omtalt som Power-to-gas. Herefter vil det blive refereret til som P2G.

² Bliver typisk omtalt som Power-to-liquid. Herefter vil det blive refereret til som P2L.

Seks grunde til at Danmark kan fungere som laboratorium til test og demonstration af storskala elektrolyseanlæg:

- Brug og lagring af vindenergi (snart mere end 50% vind i elnettet)
- Kan teste brugen af fluktuerende ressourcer og forudse potentielle udfordringer ved integration af vedvarende energi på el-nettet i andre dele af verden.
- Spildvarme ved brændselsproduktionen kan anvendes i fjernvarmesystemet.
- Danmark har en målsætning om 100% vedvarende energi i 2050 (inklusiv transport), hvilket kræver handling, især på tung transport.
- Har forskning inden for alle tre typer elektrolyse (alkalisk, fastoxid og PEM elektrolyse).
- Har producenter af kemisk syntese og elektrolyseanlæg

om at få vedvarende energi ind i sektoren. Direkte anvendelse af brint kan være med til at skubbe markedet for elektrolyse i gang, men er næppe en langsigtet løsning som brændsel til transporten. Brændselsceller drevet af brint i køretøjer bør kun blive anvendt i stedet for elbiler i de tilfælde, hvor der er brug for lang rækkevidde og hurtig genopfyldning. Imidlertid er konkurrencen fra elbiler hård, det at analyser viser, at elbiler medfører færre energitab og er mere omkostningseffektive. Også når man ser et godt stykke ud i fremtiden. Dette er dog ikke ensbetydende med at direkte anvendelse af brint ikke vil spille en rolle. Det er blot sandsynligt, at det er i hjørner af energisystemet snarere end som den bærende teknologi.

Danmark er et attraktivt sted til storskaldemonstration af elektrolyseanlæg (P2G og P2L), da der allerede er en høj andel af elektricitet baseret på vedvarende energi i systemet. Vindmøller dækker omkring hele 45% af elforbruget. Med adgang til endnu mere vindkraft med lave omkostninger, og en plan om at vind skal dække 50% i 2020, vil man med test og

demonstration i Danmark kunne løse nogle af de udfordringer, andre lande vil have, når deres andel af elektricitet baseret på vind og sol vokser.

Elektrolyse kan anses som en teknologi, der kan bidrage til at holde balance mellem produktion og forbrug, ved at integrere fluktuerende vedvarende energi. Anvendelsen af elektrolyse kan med andre ord følge produktionen af vedvarende energi og dermed balancere el systemet, samtidig med at det giver mulighed for at lagre energi. Dette kan vise sig særligt interessant, når mængden af vedvarende energi stiger, og kabler til udlandet eller andre teknologier ikke kan udnytte den vedvarende energiresource. Eksempelvis i tilfælde hvor nabolande også har meget vedvarende energi pga. sammenfaldne vejrfænomener, eller i situationer, hvor transmissionsledningerne allerede er fuldt udnyttede. Med målsætningen og dagsordenen om at nå 100% vedvarende energi i 2050 skal Danmark have forbundet fluktuerende elproduktion baseret på vedvarende energi til alle energisektorer og slutforbrugere for at skabe fleksibilitet i energisystemet, hvilket elektrolyse kan være en del af.

Som en del af denne handlingsplan er en række interessenter inden for elektrolyseteknologi blevet interviewet. De interviewede interessenter er generelt enige i, at elektrolyse kan spille en vigtig rolle i energisystemet, efterhånden som der kommer mere og mere vedvarende energi ind i energisystemet. Endvidere kan elektrolyse spille en anderledes rolle end andre integrationsteknologier. Det største potentiale anses for at være i forbindelse med brændselsproduktion til transportsektoren med et specielt fokus på metanol, DME, metan og flybrændstof. I det nuværende marked, hvor behovet for disse brændsler endnu

ikke er tilstede for teknologien, vil elektrolyse formodentligt spille en rolle i nichemarkeder med brint som det endelige slutprodukt.

De interviewede interessenter anser ikke balanceringsformål i elnettet i form af regulerkraft eller lignende som det primære fokus. De opfatter snarere transportsektoren som det sted, hvor markedspotentialet er størst. Ifølge interessenterne er en af de centrale udfordringer for en større markedsandel for elektrolyse elprisen, samt manglen på en speciel tarif til lagring af elektricitet via elektrolyse. Endvidere er der et behov for flere demonstrationsanlæg af kommercialiserede teknologier med forskellige slutprodukter og kombinationer af teknologier (elektrolyse, lagring, gasificering, syntese mv.). For SOEC er der behov for både forskning og test for at opnå det kommercielle stadie. Danmark har også behov for at tiltrække flere private investorer, som kan accelerere implementeringen af elektrolyse, men dette kræver, at der er skabt et marked.

Kapitel 1 af denne rapport præsenterer en handlingsplan for storskala brug af elektrolyse i Danmark. Handlingsplanen er inddelt i fire dele:

1. *Markedsmodning – fra nu til 2020;*
2. *Markedsoptag – fra 2020 til 2025;*
3. *Markedsgennembrud – fra 2025 til 2035;*
4. *Storskala udrulning i det smarte energisystem – fra 2035 og frem.*

Handlingsplanen redegør for aktiviteter, tiltag og incitamenter, der kan implementeres for at fremskynde anvendelsen af elektrolyse. Dette inkluderer demonstration, ny regulering, teknologiske forbedringer samt forskning.

De efterfølgende kapitler præsenterer baggrundsmaterialet, som handlingsplanen er tilvejebragt ud fra. Kapitel 2 dokumenterer den nuværende teknologiske status for elektrolyse samt fremtidsudsigter for teknologien med udgangspunkt i litteraturstudier, mens kapitel 3 præsenterer interessenternes vision for, hvilken rolle elektrolyse skal spille i energisystemet, samt hvad der skal til for at nå dette. I kapitel 4 sammenlignes en række tidligere studiers fremskrivning af elektrolyses rolle i energisystemet, og kapitel 5 sammenfatter nogle af rapportens hovedbudskaber i en perspektivering.

1 Handlingsplan for implementering af elektrolyse i det danske energisystem

At basere energisystemet på en høj andel af vedvarende energikilder vil skabe et øget behov for fleksibilitet. Derfor vil konvertering og lagring af energi blive kerneområder i det fremtidige energisystem. Det nuværende energisystem er afhængigt af fossile brændstoffer til at give fleksibilitet på ressourcensiden. Denne fleksibilitet vil i fremtiden forsvinde, i takt med at de fossile brændsler udfases, og for at kompensere for dette er der behov for nye konverterings- og lagringsteknologier. De eksisterende teknologier til lagring af energi har forskellige omkostninger, hvor lagring af energi med høj energitæthed er den billigste og mindst pladskrævende løsning [12]. At anvende elektrolyse som en del af P2G og P2L teknologien gør det muligt at lagre elektrisk strøm som brint. Denne kan herefter anvendes til enten at opgradere biomasse og biogas, eller i direkte binding med CO₂ fra forskellige kilder til at skabe metan og forskellige elektrofuels. Elektronerne fra vind- og solenergi bindes således i kemisk energi, som kan anvendes i den nuværende infrastruktur, i kombination med eksisterende teknologier.

I 2015 udgjorde vindkraft 42% af elforbruget i Danmark [13] og denne andel forsætter med at vokse. Målet for 2030 er, at 50% af energiforsyning bliver leveret af vedvarende energi. Derfor er det nødvendigt at skabe et smart energisystem [14], som er i stand til at udnytte den fluktuerende produktion af el ved at overføre den producerede el til behovssektorerne; varme, mobilitet og industri. Der eksisterer allerede mange lagringsteknologier, samt andre teknologier til at integrere vedvarende energi [12,15], men der findes stadigvæk ikke gode alternative løsninger for den tunge transport; dvs. vedvarende løsninger, der ikke samtidig truer et bæredygtigt forbrug af biomasseressourcerne. Det er her, at elektrolyse kan komme ind i billedet. Men transportsektoren er kompleks. Infrastrukturændringer er dyre og langvarige, og hvis de forkerte beslutninger bliver taget i dag, kan de føre til fastlåste problemstillinger i fremtiden. Derfor er det hensigtsmæssigt, at den eksisterende infrastruktur anvendes så meget som muligt, dog med enkelte nødvendige ændringer.

Elektrolyse er velafprøvet i enkeltstående teknologier. Kommende demonstrations og udviklingsaktiviteter bør derfor fokusere på specifikke anvendelsesmuligheder i kombinerede energisystemer snarere end på enkeltstående teknologier. Alkalisk elektrolyse og elektrolyse baseret på polymerombytningsmembraner (PEM)³ er i dag kommercielt tilgængelige teknologier. Derimod er teknologier med anvendelse af fastoxid elektrolyseceller (SOEC)⁴ stadigvæk på forsknings- og udviklingsstadiet. Hver af disse teknologier har sine fordele og ulemper. Eksempelvis har alkalisk elektrolyse, som har været tilstede på markedet i længst tid, en lav virkningsgrad. Teknologien er dog stadigvæk attraktiv, da den, i modsætning til PEM, ikke anvender ædelmetaller som katalysator. PEM elektrolyseanlæg er således dyrere at anvende, og teknologiens implementering hindres af de højere omkostninger. SOEC anlæg anvender derimod keramiske elektrolytter, som er billigt materiale, hvorfor denne teknologi er mere attraktiv set fra et økonomisk perspektiv. Ydermere kan de fungere i to retninger; både til elektrolyse og som brændselscelle. Dette gør dem interessante at anvende i systemer med en høj andel af fluktuerende, vedvarende energikilder, og desuden forbedrer det investeringen i sådanne anlæg, at de både kan lagre og producere el. Der er således et generelt behov for at kommercialisere SOEC teknologien, samt at øge driftstimerne og at sænke nedbrydningshastigheden af elektrolyse for alle teknologierne. Det er derfor vigtigt at prioritere de teknologier, som allerede er

³ På engelsk kaldet Polymer exchange membrane, herefter kaldet PEM

⁴ På engelsk kaldet Solid oxide electrolysis cells, herefter kaldet (SOEC)

tilgængelige på markedet. Her er alkalisk elektrolyse den mest modne og PEM den fremspirende. Derudover bør SOEC teknologi introduceres til markedet. Dertil bør synergi i brændselsproduktionskæden og modenheden af visse teknologier, såsom forgasning af biomasse, undersøges i forbindelse med en systemkonfiguration af brændselsproduktion.

Afprøvning af elektrolyse i Danmark har primært fokuseret på anvendelse af elektrolytisk produceret brint til opgradering af biogas, samt anvendelse af brint som slutbrændsel, som kan anvendes i små ancillary services. Danmark har et stærkt fokus på alle tre ledende teknologier inden for elektrolyse (alkalisk, PEM og SOEC), og der findes lokale producenter samt forsknings- og udviklingsaktiviteter på alle tre områder. Der er dermed ingen barrierer for at påbegynde den nødvendige omstilling af vores energisystem. Imidlertid forligger der dog heller ikke nogle umiddelbare incitamenter for at gøre det. Således er der behov for at gøre elektrolyse til en interessant forretningsmulighed ved at skabe hensigtsmæssige rammebetingelser, samt at etablere et marked for teknologien ved fortsat at implementere de tilgængelige teknologier.

Danmark har i mange år været et grønt foregangsland med et stærkt fokus på at fremme implementering af vedvarende energi. Danmark har profileret sig som verdens førende nation inden for vindenergi og landets vindindustri har delvist sikret den økonomiske vækst inden for den vedvarende energisektor. Således har 74% af beskæftigelsen inden for vedvarende energi været relateret til vindenergi [16]. Ydermere gør den høje andel af vind i elproduktionen Danmark til et velegnet sted for realistiske demonstrationer og afprøvninger af teknologier. Landets fremkomne elsystem kan derfor udnyttes til at forudse de potentielle problemer, der måtte opstå ved integration af vedvarende energi. De opnåede erfaringer kan i fremtiden deles med andre lande.

Danske erfaring med at integrere og balancere en høj andel af vedvarende, fluktuerende el gør landet til et godt sted at afprøve forskellige typer af teknologier, der kan integrere vedvarende energi i flere sektorer. Endvidere er der i Danmark virksomheder, der producerer de nødvendige teknologier, herunder elektrolyseanlæg og katalysatorer/kemiske synteseanlæg. Forsknings kapacitet inden for feltet er også tilgængelig, og denne kan understøtte den ønskede udvikling inden for SOEC teknologien, undersøgelser i forbrændingsmotorer drevet på metanol samt integration af elektrolyseanlæg i elnettet. Som gevinst udgør investeringer i elektrolyseanlæg, faciliteter til brændselsproduktion og nichemarkeder en god mulighed for at skabe lokale arbejdspladser. Endvidere kan Danmark ved at satse på disse teknologier være med til at sætte dagsordenen for fremtidig omstilling af transportsektoren, idet der er mange nationale handlemuligheder for udformningen af denne sektor.

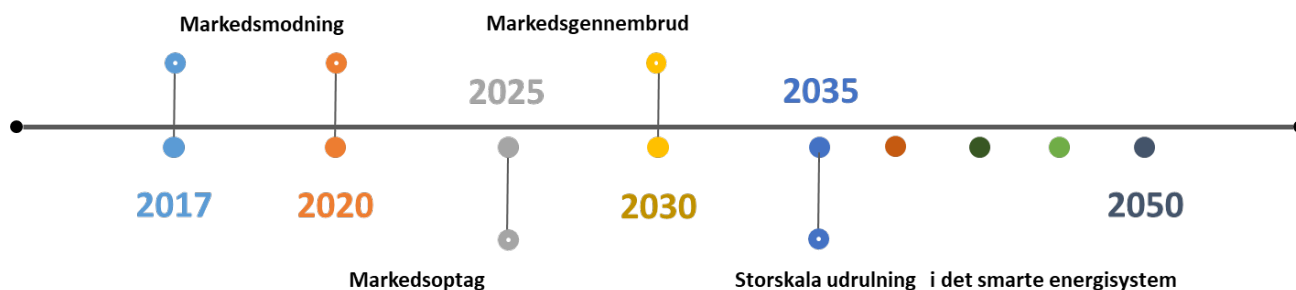
Nedenfor præsenteres en række aktiviteter, som vil bidrage til at omstille transportsektoren inden for rammerne af det vedvarende energisystem. Her gives først et overblik af det teknologiske parathedsniveau (TRL)⁵ af de produktionsmåder der anvendes til brændselsproduktion. Dette korte overblik skulle gerne give indsigt i den teknologiske status for de vigtigste komponenter i P2G og P2L koncepterne.

Aktiviteterne er grupperet i forhold til deres indsatsområde og er samtidig baseret på den trinvis udvikling som forudses at være nødvendig for at implementere og anvende elektrolyse i energisystemet. Handlingsplanen er inddelt i fire primære stadier, hvilket illustreres i Figur 2:

1. Markedsmodning – nu til 2020

⁵ Teknologisk parathedsniveau er defineret i overensstemmelse med den Europæiske Kommission

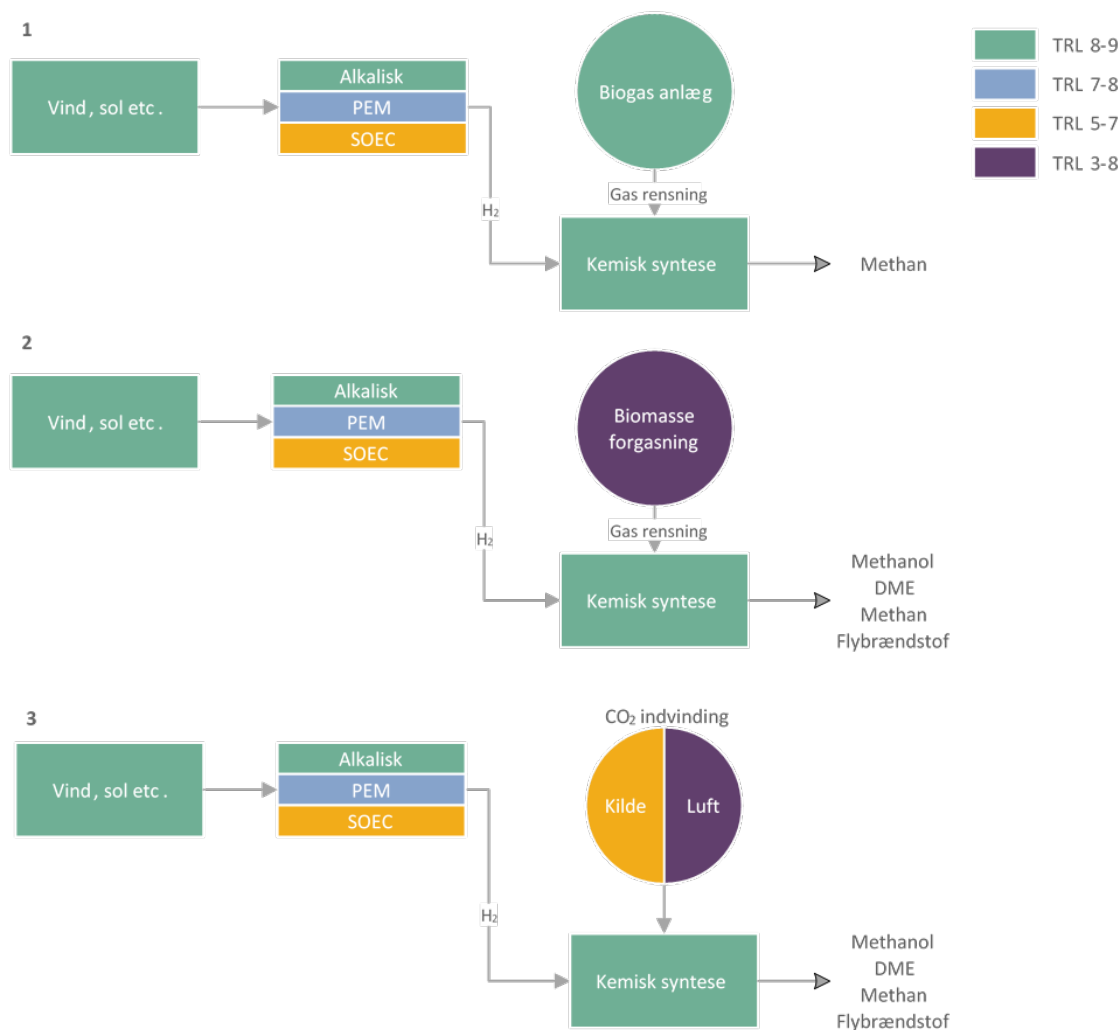
2. Markedsgennembrud – periode fra 2020 til 2025
3. Markedsoptag – periode fra 2025 til 2035
4. Storskala udrulning i det smarte energisystem – fra 2035 og frem



Figur 2. Handlingsplan for anvendelse af elektrolysesystemer fra nu og frem til 2050

1.1 Overblik over teknologierne og deres udviklingsstadie

Der er, som tidligere beskrevet, forskellige måder at anvende elektrolyse på. Det følgende afsnit fokuserer på udviklingsforløbet for teknologierne inden for P2G og P2L. De individuelle teknologier til brændselsproduktion er generelt mere udviklede end tidligere antaget, men som samlet koncept er de integrerede produktionssystemer endnu ikke demonstreret at virke på større skala. De fleste af teknologierne, der påtænkes at fungere som enkelt- eller delkomponenter i systemet, befinder sig på forskellige teknologiske parathedsniveauer. Figur 3 illustrerer derfor en vejledende status for udviklingen af teknologierne i de tre koncepter, der anses for mest lovende i forhold til at løse problemstillingerne i forbindelse med omstilling af transportsektoren.



Figur 3. El-til-brændsel konverteringsprocesser med vejledende teknologisk parathedsniveau (forkortet: TRL): 1) biogasopgradering med elektrolyse, 2) biomasse-hydrogenering og 3) CO₂-hydrogenering til det ønskede brændselsprodukt

Ud af de tre primære typer af elektrolyse, har alkalisk elektrolyse været tilgængelig på markedet i længst tid og har hovedsageligt været anvendt til industri (TRL 9) med kapaciteter op til 100 MW_{el}. PEM-elektrolyse har været fremspirende på markedet det seneste årti (TRL 7) og er på nuværende tidspunkt kun tilgængelig med kapaciteter under 10 MW_{el}. SOEC befinder sig stadigvæk på udviklingsstadiet (TRL 5). Prototyper med kapaciteter i kW-størrelsesordenen bliver afprøvet både i Danmark og i Tyskland indenfor disse koncepter [10,17].

Biogasanlæg er i dag en fuldt kommercialiseret teknologi (TRL 9). I Danmark forefindes 21 centraliserede storskala anlæg, samt 45 anlæg på gårdskala [18]. Samtidig anses opgradering af biogas ved hjælp af brint ifølge [19] til at være på grænsen til at være en moden teknologi (TRL 7-8). Koncept 1 i Figur 3 foroven er afprøvet i Danmark [17,20]. Dette koncept kan udvides til også at producere flydende brændsler. Imidlertid kan der dog være yderlige energitab og dermed et mindre udbytte af brændsel forbundet med en sådan udvidelse. Som teknologi varierer forgasning af biomasse meget i forhold til teknologisk parathedsniveau. Dette skyldes dels de mange komponenter som er en del af et forgasningssystem og dels de forskellige typer af forgasningsanlæg (TRL 3-8). I Danmark har Pyroneer teknologien på 6 MW_{el}, som kan drives af forskellige

typer biomasse, været afprøvet med succes. Projektet er dog blevet lukket, og der er ikke fremlagt nye planer om det siden 2014 [21]. Produktionskæden med hydrogenering af biomasse (koncept 2) er så vidt forfatterne ved, endnu ikke blevet testet i hverken Danmark eller andre lande. Forgasning af biomasse med efterfølgende metanisering uden tilførsel af brint er testet i forbindelse med projektet GoBiGas i Gøteborg [22]. Forskellige typer af biomasse kan anvendes som brændselskilde i forbindelse med forgasning, og i Danmark vurderes halm at kunne spille en stor rolle i forbindelse med brug af denne teknologi. Biogasanlæg bestræber sig på at anvende så tørre materialer som muligt. Derfor formodes det, at der i fremtiden vil ske en øget anvendelse af halm i denne type anlæg.

På kort sigt kan indfangning af CO₂ ske direkte fra store udledningsskilder, såsom kraftværker eller industrielle anlæg, mens der på længere sigt vil kunne indfanges CO₂ direkte fra luften. Det første pilotanlæg til indfangning af CO₂ fra et stationært anlæg startede i 2006 i Danmark som en del af CASTOR projektet [23]. I 2014 var der på verdensplan 22 anlæg/fabrikker, som havde installeret teknologi til indfangning af CO₂. Heraf var 13 i drift og 9 under opførelse. Tre ud af de 22 anlæg indfangede CO₂ fra kraftværker i Canada og USA, men resten af anlæggene var industrialanlæg [24]. Det skal bemærkes, at alle disse anlæg har til formål at indfange og lagre CO₂, hvilket ikke er formålet med de foreslåede produktionskæder i denne rapport, som nærmere fokuserer på indfangning og genbrug af CO₂. I forhold til koncentreret indfangning fra specifikke udledningsskilder er indfangning før og efter forbrænding stadig under afprøvning (TRL 5-7). De fleste teknologier til indfangning fra luft er stadigvæk på prototype-niveau (TRL 3-4) [25]. Der forelægger rapporter om, at elektrodialyse og absorbering af temperaturudsving begge er på TRL 6 [26]. På baggrund af tests af koncept 3 på to anlæg [9,10] har Pérez-Fortes *et al.* [27] vurderet, at konceptet har et TRL på 6-7. Såfremt SOEC opnår det ønskede teknologiske niveau, kan muligheden for at lave kombineret CO₂- og H₂O-elektrolyse realiseres. Dette ville være en yderligere mulighed for koncept 3, hvor det optimale slutprodukt ville være metanol set i forhold til de nuværende udbytte af syntesegas, som er en blanding af CO og H₂.

Brændstof til anvendelse i forbindelse med tung transport - såsom skibe og lastbiler - bør prioriteres, da det er meget usandsynligt at behovet for disse typer af transport kan imødekommes alene gennem elektrificering. En anden del af transportsektoren som bør have opmærksomhed er flytrafik, idet energieffektiviteten af denne kan forbedres. Imidlertid vil det øgende brændselsbehov i forbindelse med en forventet stigning i flytrafikken dog overstige gevinsten ved en forbedret energieffektivitet. I denne handlingsplan er brugen af elektrolyse som en del af løsningen på flytrafikken inkluderet, da det er yderst vigtigt at finde en løsning på problematikken vedr. flybrændstof på globalt niveau. Produktion af Flybrændstof kan gennemføres ved brug af ovenstående koncepter afsluttende med kemisk syntese (TRL 9) enten med Fischer-Tropsch teknologi eller fremstilling af metanol. Flybrændstof har mange restriktioner i forhold til tekniske godkendelser, og ethvert alternativt brændstof, som ikke produceres med FT-teknologien bliver ikke godkendt til anvendelse. Metanol og DME er ikke umiddelbart velegnede som brændsler til flytrafik, hvorfor det er nødvendigt at konvertere disse til flybrændstof gennem såkaldt olefinsyntese, der involverer oligomerisation og hydrotreating [26]. FT-syntese er kommercialiseret og tilgængelig på stor skala, mens mindre skala FT-syntese kun har TRL 5-6 [19]. Dette er på nuværende tidspunkt et problem, da de andre nødvendige komponenter i produktionskæden kun findes i mindre skala. Integreret produktion af P2L flybrændstof med et omvendt vand-gasskifte reaktion er kun blevet realiseret på forskningsniveau. Imidlertid er det generelle teknologiske parathedsniveau for P2L-teknologien TRL 5-8 [26]. Det er vigtigt at notere, at produktionen af flybrændstof vil afgive en række forskellige biprodukter langs hele produktionskæden, herunder benzin og diesel, som kan bruges til vejtransport.

1.2 Fase 1: Markedsmodning – fra nu til 2020

Den nuværende langsigtede planlægning mangler klarhed, og der er behov for konsistens i visionerne for energiproduktion og -omstilling. Der er således behov for en klar strategi for, hvorledes udvikling kan fremskyndes, og som gør det muligt at rette større opmærksomhed mod en række nøgleteknologier og sætte dem på dagsordenen. Mange regulerende tiltag, der er relateret til vedvarende energimål, slutter i 2020. Således er potentielle investorer meget konservative i deres opbakning til nye teknologier, som ikke klart er en del af regeringens planer. Investorerne støtter derfor hovedsageligt anerkendte teknologier. Både den akademiske verden og regeringen kan evaluere behovet for disse teknologier, udvikle og påbegynde målrettede forskningsprogrammer, uddannelser og investeringer. Det er imidlertid vigtigt, at en regulering anerkender bæredygtighedsfordelene ved brændsler produceret gennem elektrolyse, da de har lav arealanvendelse, lavt vandforbrug og kan potentielt være CO₂-neutrale, hvis det anvendte kulstof er indfanget fra atmosfæren. Ingen af de andre alternative vedvarende brændsler besidder disse karakteristika.

I løbet af perioden til markedsmodning er målet at udvikle enheder til afprøvning af elektrolyse samt at integrere disse med produktionsanlæg, der har installeret **elektrolysekapacitet på mellem 1-3 MW_{el} per anlæg**. Samlet tilstræbes det at opnå en total installeret kapacitet i størrelsesordenen **7 til 10 MW_{el} (3 til 5 anlæg)**. Det primære fokus vil være på alkalisk elektrolyse og PEM-baseret elektrolyse, men i takt med at SOEC teknologien opnår det ønskede teknologiske parathedsniveau, bør fokus omstilles mod denne teknologi. Nye demonstrationsprojekter bør fokusere på at få op skaleret kapaciteten af elektrolyseanlæggene i de eksisterende demonstrationsenheder.

AKTIVITETER RELATERET TIL DEMONSTRATION OG PLACERING AF ANLÆG

- **Demonstration af P2G og P2L systemer**

Der er behov for flere demonstrationsprojekter til at afprøve systemerne, at forbedre businesscasen, at opnå erfaringer med teknologierne og skabe større viden og opmærksomhed blandt offentligheden. Demonstrationsprojekter kan støtte den nødvendige vidensdeling, være med til at løse driftsproblemer og opmuntre til den nødvendige udvikling mod et forbedret samspil med resten af energisystemet. Ligeledes skal forskellige konfigurationer afprøves for samtidig at maksimere synergien mellem anlægskomponenterne og fleksibiliteten og for at skabe nye indtægtskilder såsom ved fjernvarmeforsyning.

Elektrolysebaserede teknologier som skal demonstreres:

- Opgradering af biogas ved hjælp af elektrolyse til gas og flydende brændsel
- Koncentreret CO₂ indfangning fra enkeltstående udledningsskilder (f.eks. kraftværker eller industrielle anlæg) med elektrolyse til flydende- og gasbrændsel
- Forgasning af biomasse med tilføjelse af elektrolytisk produceret brint til skabelse af flydende brændsler

Demonstrationsprojekter bør baseres på de allerede kommercialiserede og tilgængelige teknologier, som er alkalisk elektrolyse og PEM, imens pilotprojekter bør etableres til at teste SOEC-teknologier. Demonstrationsprojekter bør fokusere på at kunne levere brændsel til tung og havtransport. Som en del af en omstrukturering af markedet, der vil blive beskrevet senere i rapporten, kunne der oprettes en udbudsordning til pilot- og demonstrationsanlæg, hvor eksempelvis 30% af investeringen for hele

systemet (ikke kun til elektrolyseanlægget) gives i tilskud. Demonstrationsanlæggene kan også være større en angivet ovenfor, men under alle omstændigheder bør de indeholde en samling af teknologier og ikke kun elektrolyseanlægget jf. integrationsperspektivet.

- **Anbringelse af anlæg som muliggør fremtidig tilslutning til el-, varme- og gasnetværk.**

Det er vigtigt, at anlæg placeres der, hvor de har den bedste potentielle forbindelse til el-, varme- og gasnetværk, da dette kan minimere omkostningerne ved etablering af nye netværk. Placering af anlæggene bør ske på kommunalt niveau, da der er gode erfaringer med denne tilgang ved placering af vindmøller og biogasanlæg. For at skabe en effektiv brug af eksisterende og nye el-transmissionsnetværk skal placeringen af anlæg samtidig tage højde for slutforbrugeres behov, brændselsinfrastruktur, de nødvendige ressourcer og nærheden til vindenergi. Brændselsproduktionsanlæg producerer overskudsvarme, hvorfor placering tæt på et fjernvarmenetværk er attraktiv såvel som en placering tæt på gasnetværket, hvis det endelig produkt fra produktionen kan tilføres det eksisterende gasnetværk.

- **Overvej fleksibel drift for at imødekomme vedvarende energikilder**

Driften af anlæggene skal afstemmes med de forventede fluktuationer i produktion af vedvarende energi til systemet, hvorfor konstant drift ikke bør prioriteres. Af samme grund bør kapaciteten af anlæggene ikke justeres i forhold til en konstant driftstilstand. Dette sikrer, at elektrolyseanlæggene kan maksimere integrationen ved at anvende og oplagre den overskudsproduktion af vedvarende el, som finder sted i systemet, når vindkapaciteten forøges. Der har allerede været dage, hvor det nuværende energisystem udelukkende har været forsynet med el fra vind, sol og kraftvarmeværk uden nogen central kraftværksproduktion. En sådan situation forventes at indtræffe oftere i fremtiden, hvorfor det er vigtigt at vælge den korrekte installerede kapacitet af elektrolyse for bedst at kunne bistå integrationen af fluktuerende elproduktion i systemet.

REGULATIVE TILTAG OG SUPPLERENDE INCITAMENTER

- **Markedsdesign til implementering af elektrolyse**

For at introducere elektrolyseanlæg på markedet er det vigtigt at skabe specielle markedsvilkår, således at denne nye type anlæg kan konkurrere med etablerede og billigere teknologier. Det er med andre ord vigtigt at få konstrueret og designet markedsvilkårene for denne nye energiinfrastruktur og teknologi for at sikre dens konkurrencedygtighed i forbindelse med omstilling til et system baseret på disse teknologier. Gasholdige og flydende brændsler produceret ved elektrolyse kan og bør ikke anses som konkurrent til etablerede fossile brændsler såsom naturgas, diesel eller benzin, men som en del af et nyt marked af vedvarende transportbrændsler. Elektrofuels vil konkurrere med elektriske køretøjer, bio etanol og andre typer af biobrændsel. Erfaringer har dog vist, at den nuværende markedsstruktur ikke er tilpasset de teknologier, der forbinder el med gas og flydende brændsler til transport. Derfor er der i dag en stor risiko ved overhovedet at investere i nye teknologier, og denne risiko bør reduceres. Nye markedsvilkår for anvendelse af elektrolyse bør afprøves i perioden frem til 2020 og disse kunne eventuelt afgrænses til kun at omfatte eksempelvis anlæg med kapaciteter mellem 7 til 10 MW_{el} eller 3-5 anlæg, som modtager støtte svarende til eksempelvis 30% af investeringen. Desuden er det vigtigt at sikre, at anlæggene drives på en måde, som kan afprøve fremtidige markedsvilkår. Der bør tages hensyn til følgende principper ved etablering af markedsvilkårene:

- Nærhed til elektricitet fra vedvarende kilder (for at begrænse behovet for at udvide distribution og/eller transmissionsnetværk)
- Nærhed til fjernvarme (for at kunne anvende overskudsvarme) og
- Nærhed til gasnetværket (hvis nødvendigt)

Et innovativt markedsdesign bør også tage højde for, at disse anlæg ikke bør operere som grundlast, men bør kunne stoppe når priserne er høje; altså typisk når vinden ikke blæser. Dette vil muliggøre en højere anvendelsesgrad af den fluktuerende vedvarende energi. Et tidligere studie har vist, at en driftstid på 50% er passende, set i forhold til hvordan markedet for elektrolyse bør designes for at øge udnyttelsen af vindenergi [28]. Dette er afgørende i forhold til at sænke omkostningerne for det samlede system, da det kan:

- Muliggøre en lavere anvendelse af kraftværker og kraftvarmeværker og øge anvendelsen af billig vindenergi;
- Bidrage væsentligt til at øge den teknisk-mulige andel af vindenergi i det samlede energisystem;
- Reducere de langsigtede investeringsomkostninger i distributions og transmissionsnetværket, hvis anlægget er placeret tæt på vindenergi (elektricitet kan gå direkte fra vindenergi til elektrolyse i stedet for at blive transporteret til slutforbrugere via nye eller eksisterende transmissions og distributionsnetværk).

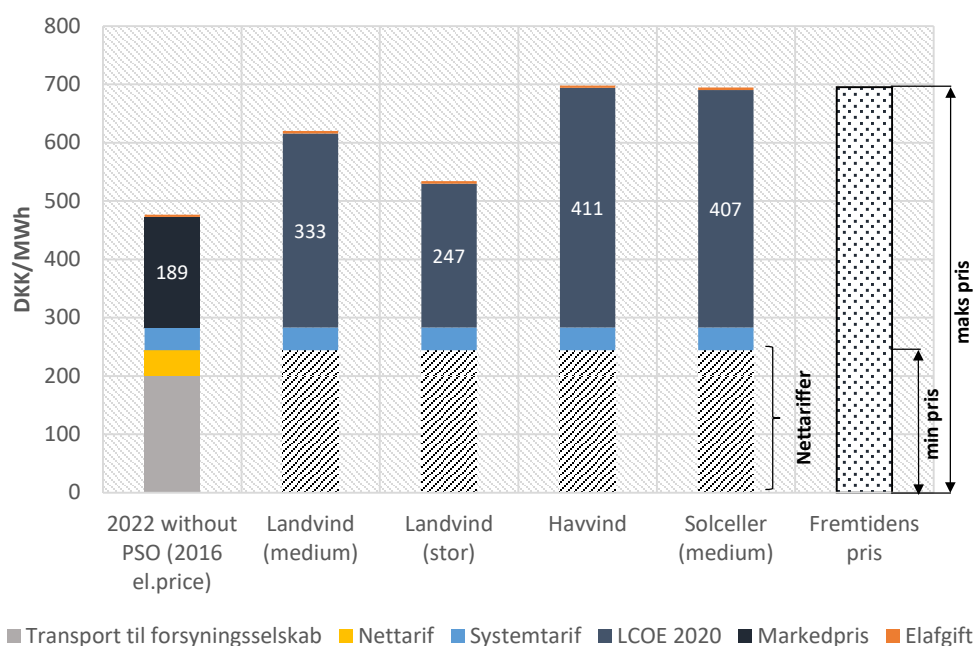
I Figur 4 præsenteres de nuværende elpriser sammen med de forventede elpriser for 2022. Vi anbefaler, at der konstrueres et begrænset marked for 7-10 MW_{el}, der kan udnytte fordelene ved at anvende elektrolyseanlæggene på tidspunkter med "lav overbelastning" af elnettet. Figur 4 illustrerer denne principielle ordning, hvor:

- Betalingen til distributions- og transmissionsoperatører (DSO og TSO) bør tilpasses driftstiden og placeringen af elektrolyseanlægget. Herunder antages det, at en sådan drift kan sænke marginalomkostningerne for udvidelse af nettet i fremtiden, såfremt anlæggene er placeret i nærheden af central vedvarende energiproduktion.
- Alternativt kan betalingen til DSO og TSO erstattes med egne investeringer i netværksforbindelsen til vedvarende energiproduktion, som f.eks. en vindmøllepark, dog med nogle krav til deling af forbindelsen i overensstemmelse med reglerne formuleret af TSO'en og andre relevante autoriteter.
- Betalingen af el er baseret på princippet om, at størstedelen af elektriciteten kan anvendes direkte fra vindmølleparker og bør derfor baseres på den "reelle" omkostning, hvilket vil sige både de langsigtede investeringsomkostninger og de kortsigtede omkostninger (LCOE) af både vedvarende energianlæg og netværk.

Dette betyder ifølge Figur 4, at den laveste pris på el (i DKK per MWh) opnås med landvindmøller, plus systemtariffen (balancering og regulering), og tilslutning til el-netværket (DSO/TSO tarif eller egne tilknytningsomkostninger). Omkostninger ved tilslutning til elnettet kan være meget lave afhængig af nærheden til vedvarende energiproduktion og muligheden for at operere i overensstemmelse med denne. Figur 4 viser, at havvindmøller med de nuværende gennemsnitlige DSO og TSO tariffer har den højeste omkostning. Princippet bør være, at store elektrolyseanlæg placeres i nærheden af eksempelvis store hav-

eller landvindmølleparker. Placeringen af elektrolyseanlæg i nærheden af gasnettet, gaslagringsmuligheder og mulighed for at bidrage til fjernvarme kan være afgørende for de samlede omkostninger for anlægget. Derudover har slutanvendelsen af brint til eksempelvis elektrofuels stor betydning.

Den endelige ændring af betalingen til DSO og TSO, herunder designet af en marginalpris-tilgang til denne betaling, bør konstrueres i samarbejde med Energinet.dk og andre relevante aktører. Idéen er dog, at bestemte principper bør afprøves frem mod 2020. I den næste fase, frem mod 2025, kan flere anlæg afprøves, såvel som nye støtteordninger eller markedsvilkår. Som en del af testanlægget bør licitationstilbuddet sikre, at de producerede brændsler bliver anvendt til brændselsblandinger i transportsektoren.



Figur 4. Forslag til ordning for forskellige vedvarende energikilder og deres LCOE sammen med antagne omkostninger for 2022 når PSO-tariffen er fjernet (el-markedspris for 2016)

- **Niche gasmarkeder og brint som slutbrændsel**

Etableringen af elektrolyse til markeder for specialiserede gasanvendelser vil muliggøre introduktionen af teknologien i energisystemet og gøre det muligt at afprøve driftsvilkårene. Brint som slutbrændsel har allerede en etableret støtteordning i form af EU lovgivning, og der foreligger desuden initiativer til etableringen af den nødvendige infrastruktur. Disse forhold danner en god indgang til markedet for anvendelse af elektrolytisk brint og mere komplekse brændselsystemer. Etableringen af et marked for specialiseret gasanvendelse vil derudover være en mulig indgang for industriel anvendelse af elektrolyse.

- **Betydning af nye blandingsstandarder**

Ifølge blandingsstandarderne bliver metanol og DME på nuværende tidspunkt anset som oxygenatorer, med tilladte blandingsforhold på op til henholdsvis 3% og 22% af den samlede volumen [29]. De tilladte blandingsforhold stammer fra 1985. En opblanding med disse brændstoffer i almindeligt brændstof er dog ikke obligatorisk, som det er gældende for ætanol, hvorfor de gældende regler ikke understøtter brugen af disse brændstoffer. Moderne benzinkøretøjer kan køre på metanol blandinger på op mod 15

volumenprocent [30]. Langsigtet planlægning bør sikre, at elektrofuels (hovedsageligt metanol og DME) bliver anerkendt ift. lovgivning ved at promovere standarder for opblanding, der fremmer de brændsler, der har et lavt forbrug af biomasse og/eller brændsler baseret på genbrugt/indfanget kulstof. Danmark bør fremme disse ændringer på europæisk niveau, da begrænsningen for denne specifikke lovgivning skyldes den nuværende topstyrede tilgang. Ændringer i hhv. Direktivet for vedvarende energi [31] og Direktivet for brændselskvalitet [29] har medført en anerkendelse af vedvarende gasholdige og flydende brændsler af ikke biologisk oprindelse. Dette indbefatter således også brændsler fra P2G og P2L teknologier, og disse bør medregnes som vedvarende energi til transportsektoren og føre til en tilsvarende beregnet reduktion af drivhusgasudledninger [31].

Det er teknisk bevist og demonstreret, at køretøjer kan køre på både en høj koncentrations blanding af metanol samt 100% metanol og DME brændsler. De bekymringer, der er forbundet med brugen af disse brændsler, er forståelige, når de nuværende bilstandarder tages i betragtning. Imidlertid vil en udelukkelse af disse brændsler fra markedet gøre det umuligt at skabe et marked for køretøjer, der kører på disse brændsler. Ligeledes forsvinder muligheden for at modificere nuværende køretøjer, på samme måde som man modificerede benzinmotoren til at køre på LPG samtidig med at man skabte den nødvendige ændringer i infrastrukturen.

- **Oprettelse af et videnscenter**

Der bør oprettes et videnscenter for at skabe bedre kommunikation mellem de industrielle producenter af elektrolyseanlæg og forskere. Dette center skal fokusere på udvikling af produktionsenheder og implementering af elektrolyse til produktion af avancerede transportbrændsler (elektrofuels). Der forefindes testenheder i Danmark og flere steder i Europa, og for at undgå at gentage afprøvninger der allerede er foretaget, bør de indhøstede erfaringer deles. En sådan vidensdeling vil fremskynde såvel den teknologiske udvikling som markedsindtrængningen. Allerede eksisterende partnerskaber i Danmark - såsom "Partnerskabet for brint og brændselsceller" og "Partnerskabet for Termisk Forgasning" - kunne med fordel forbindes. Samtidig kan man, ved at mindske kløften mellem den akademiske verden og industrien, potentielt realisere det væsentlige mål om at promovere innovationen og samtidig skabe investeringer i energitransition. Videnscentret er også vigtigt i forhold til at skabe kommunikationskanaler mellem investeringer i elektrolyse og fremtidige ændringer i det samlede energisystem. Dette skyldes især at elektrolyseteknologien udgør et stort potentiale for integration af vedvarende energi og skaber en forbindelse mellem to vigtige sektorer – elektricitet og transport.

TEKNOLOGISKE FORBEDRINGER OG FORSKNINGSTILTAG

- **Forsknings- og udviklingsaktiviteter**

For P2G og P2L anlæg er der mange mulige og forskellige teknologiske sammensætninger, alt afhængig af de anvendte ressourcer og de ønskede slutprodukter. Imidlertid befinder de relevante teknologier sig på forskellige stadier i deres teknologiske livscyklus, hvorfor det vil variere præcist hvilke forsknings- og udviklingsaktiviteter, der er behov for. I det følgende er de vigtigste teknologier nævnt:

Det er nødvendigt, at SOEC teknologi opnår et højere udviklingsstadium og muligvis kommerialisering i løbet af de kommende 10 år. Der er derfor behov for flere forskningsaktiviteter, dels for at forbedre brændselscellernes holdbarhed og virkningsgrad, dels med henblik på at sikre en optimal integration i

energisystemet. Der er behov for yderligere udvikling af forgasning af biomasse - inklusiv reetablering af den succesfulde danske Pyroneer teknologi - samt støtte til en fremtidig opskalering, da der i det fremtidige energisystem er behov for at udnytte alle de uhomogene rester af biomasse. Indfangning af kulstof fra specifikke udledningskilder er en teknologi på demonstrations niveau, men der er behov for yderligere forskning i, hvorledes man bedst muligt indfanger kulstof fra luften. Der finder ingen undersøgelser sted omkring opskalering af denne type teknologier på nuværende tidspunkt. For at gøre transportsektoren CO₂-neutral er en af de største udfordringer at finde et vedvarende alternativ til de brændstoffer, der i dag anvendes til flytrafik. Der er en mangel på teknisk gennemførlige alternativer, da de eksisterende alternativer kræver store mængder biomasse og vand. Disse alternativer er på det samme udviklingsstadium. Derfor bør man i Danmark intensivere forskningen i produktion af flybrændstof baseret på elektrolyse, da det kunne gøre Danmark førende på det globale marked inden for dette område.

Centrale teknologier:

- SOEC
- Forgasning af biomasse (Pyroneer og Viking)
- Indfang af CO₂ fra stationære udledningskilder og luft
- Brændsel til flytrafik fra P2L

- **Afprøvning på forskellige fartøjer**

For at opnå viden om køretøjers ydeevne og effektivitet er det vigtigt at teste motorer og køretøjer kørende på disse brændstoffer. Brændstoffer, der produceres med anvendelse af elektrolyse, kan være i gas- eller flydende form, hvorfor det er muligt at afprøve og på sigt at anvende dem i skibs- og lufttransport, hvor der mangler alternativer. Dette kan ske gennem forskningsinstitutioner eller ved at teste eksisterende køretøjer på markedet. Erfaringer kan tilvejebringes og samarbejder etableres mellem de lande, som på nuværende tidspunkt forsker i denne type brændstoffer. På Island foregår der på nuværende tidspunkt en afprøvning af køretøjer, der anvender metanol som brændstof, og i Sverige har VOLVO fremstillet lastbiler til tung transport, der kører på DME [32,33]. Stena Germanica har omdannet færgemotorer til at køre på metanol og har testet tre motorer, som kan køre udelukkende på dette brændstof [34]. DME køretøjer behøver en speciel brændstoftank, men VOLVO har gennemført vellykkede konverteringer af diesel køretøjer til DME brændsler.

Tests af mindre køretøjsflåder i Danmark bør påbegyndes i samarbejde med enten en virksomhed eller en kommune. Der bør i perioden op til 2025 testes 10 køretøjer med forbrændingsmotorer kørende på DME, samt omdannelse af én færge til at sejle på metanol.

1.3 Fase 2: Markedsoptag – fra 2020 til 2025

Markedsoptagsfasen er meget vigtig, da den vil tjene til at gøre teknologien mere synlig og dermed tiltrække investorer, såfremt de tidligere skridt er gennemført med succes. I denne periode er det målet, at opskalere elektrolyse-enhederne og afprøve større MW-kapaciteter. De enkelte anlægs størrelse tænkes at være af en størrelsesorden rangerende fra **5 til 20 MW_{el} per anlæg**, med en total installeret kapacitet mellem **30 og 50 MW_{el}**. Dette vil stemme overens med målet om **5 til 10 elektrolysebaserede anlæg**. Det forventes, at dette rent teknisk er muligt at opnå for de kommercialiserede elektrolyseteknologier, idet alkalisk elektrolyse allerede har opnået en trecifret MW størrelse. Investeringsomkostningerne vil i denne forbindelse være den største udfordring. Businesscasen kan forbedres ved at ændre i reguleringen, hvilket bør introduceres i den første fase af handlingsplanen.

AKTIVITETER RELATERET TIL DEMONSTRATION OG LOKALISERING AF ANLÆG

- **Opskalering af testenheder**

Det er essentielt, at afprøvningerne og demonstrationerne i den forrige etape er vellykkede, for således at muliggøre det næste trin, som er opskalering. Opskalering er særlig vigtigt, da den kan synliggøre adskillige problemstillinger, der potentielt kan opstå i forbindelse med implementering af teknologien. Endvidere kan den reducere prisen samt forbedre teknologiernes effektivitet. Opskaleringen kan, når den først er påbegyndt, udføres i løbet af en relativ kort periode. For de fleste teknologier er storskala anlæg favorable, da der således er mulighed for stordriftsfordele. Denne etape har behov for økonomisk støtte. Hellsmark og Jacobsson har undersøgt størrelsesordenen af de nødvendige investeringer i forbindelse med forgasning af biomasse, for at denne kunne bidrage væsentligt til markedet for brændselsproduktion. De estimerede, at der i alt er et behov for investeringer i størrelsesordenen af 60-120 milliarder euro i EU [35]. Når demonstrationsanlæggene har vist sig at være rentable, vil næste skridt være at fortsætte opskaleringen samt at skabe en markedsføringsstrategi for finansiering af kommercielle anlæg.

- **Etablering/tilpasning af brændselsinfrastruktur efterfulgt af udvidelse af bilflåden og test på landevejene**

Stor skala undersøgelser af biler, samt udvidelse af antal af køretøjer, kørende på benzin iblandet en højere procentvis andel af metanol end den foreskrevne bør igangsættes. DME bør implementeres som brændstof til køretøjer med dieselmotorer, der er dedikerede eller tilpassede til brugen af DME. En sådan indsats kunne finansieres gennem projekter eller iværksættes i forbindelse med, at virksomheder, der ønsker at styrke deres grønne profil, udskifter deres køretøjer. Samtidig må den nødvendige brændselsinfrastruktur etableres. Tankstationer til tankning af brint er allerede på plads i Danmark, og der er i EU i vid udstrækning muligt at søge støtte til udvidelse af denne form for infrastruktur. For at etablere en velfungerende infrastruktur med tilpas mange genopfylningsmuligheder, er det nødvendigt at tilpasse eksisterende tankstationer samt etablere nye tankstationer til andre brændsler, såsom metanol og DME. I takt med disse aktiviteter bør den samlede bilflåde kørende på disse brændsler udvides. Der findes en metanoltankstation i Danmark, men endnu er ingen af de konventionelle tankstationer tilpasset til også at kunne tilbyde metanol og DME. DME har egenskaber, som er sammenlignelige med propan. Derfor kan den markedsstilgængelige teknologi fra anvendelsen af propan også anvendes til DME. Ved at etablere en sådan fleksibel infrastruktur vil der være et godt grundlag for at udvide markedet for både vedvarende transportbrændsler og samtidig køretøjer, der anvender disse.

- **Forsøg med produktion af flybrændstof.**

Hvis forskningen i produktion af flybrændstof intensiveres i første etape, kan der i denne fase påbegyndes de første forsøg med produktion af flybrændstof med elektrolysebaseret teknologi. Formålet bør være at udvikle integrerede brændselskonverteringsfaciliteter, som kan opskaleres, da det på lang sigt vil være nødvendigt at imødekomme behovet for flybrændstof med alternative brændstoffer baseret på vedvarende teknologi. Pilottests af produktionsfaciliteterne skal foregå parallelt med tests af det producerede brændsel i flymotorer for at sikre, at det producerede biobrændstof kan imødekomme krav om brændselegenskaber og præstationsniveau. Etableringen af en konsistent database indeholdende data for forskellige motorenes ydeevne og produktionscyklusser under anvendelse af de nye brændstofferne bør igangsættes for dermed bedre at kunne føre tilsyn med mulighederne for teknologien. Ligeledes er der behov for en evaluering af de af udviklingen affødte behov og de nødvendige ressourcer til oplæring af personel.

- **Lokalisering af anlæg som en del af beslutningsprocessen**

I forbindelse med opskaleringen af produktionsanlæggene bør placering og systemintegration ligeledes overvejes. Dette inkluderer identifikation af adgang til kulstofkilder, biomasse/biogas kilder og eksisterende elektricitets-, gas- og fjernvarmenetværk, alt afhængig af typen af anlæg. Placeringen af elektrolyseenheder tæt på anlæg der producerer vedvarende elektricitet vil være at foretrække frem for en udvidelse af det eksisterende netværk. Transport af det endelige brændselsprodukt kan allerede varetages i det nuværende system, hvorfor dette ikke anses som en reel problemstilling.

LOVGIVNINGSMÆSSIGE TILTAG OG SUPPLERENDE INCITAMENTER

- **Elektrolyse som en fundamental teknologi i det smarte energisystem.**

I forhold til udviklingen af teknologien spiller de politiske rammebetingelser en hovedrolle. Ved at skabe stabile markedsforhold kan der opfordres til investeringer og tests i stor skala. Elektrolyse skal anses som en fundamental teknologi i de langsigtede visioner for det smarte energisystem. Der er behov for et markedsdesign, der gør det muligt at udnytte lave priser på vedvarende energi, for på den måde at gøre driften af de brændselsproducerende anlæg fleksibel og få disse anlæg til at følge produktionen af vedvarende elektricitet. Dermed undgås problemer med stabilitet og krav om udvidelse af netværket. Kapaciteten af elektrolyseanlæggene skal være med til at sikre en maksimal udnyttelse af lave priser på vedvarende energi samt bidrage med den nødvendige fleksibilitet til systemet. Udformningen af støtteordninger i forbindelse med det nye markedsdesign, som er blevet testet i den første fase indtil 2020, bør udbygges og skal muligvis tilpasses ift. de erfaringer, der er gjort. Ved etablering af et marked for 30-50 MW_{el} anlæg skal der tages højde for principperne i den forrige fase. Det kan stadig være nødvendigt med konkrete investeringssubsidier, for at SOEC teknologien kan nærme sig en egentlig kommercialisering. Dette bør til gengæld ikke være nødvendigt for PEM og alkalisk elektrolyse.

- **Markedsetablering for salg af brændsler**

Det er vigtigt at etablere et marked for salg af de producerede brændsler for at kunne forebygge en potentiel negativ spiral. Hvis investeringer i infrastrukturen ikke finder sted, fordi der endnu ikke er nok køretøjer til at anvende denne, og bilproducenterne ikke sælger biler til konkurrencedygtige priser sammenlignet med de konventionelle køretøjer, kommer der ikke nogen efterspørgsel fra kundernes

side. Kunderne vil ikke ønske at købe disse køretøjer, før infrastrukturen er til stede eller er spredt rundt om i landet i en tilstrækkelig grad, dvs. tillader den rækkevidde konventionelle køretøjer tilbyder. En række byer kunne udvælges som pilotprojekter til test af mobilitetsmulighederne ved brug af elektrofuels. Et sådant projekt vil, sammen med et favorabelt afgiftssystem på brændsler, forbinde elektrofuels med andre alternative brændsler. Øget offentlig viden omkring sikkerheden af de nye brændstoffer på markedet, samt konkrete planer for en egentlig omstilling og ændring i infrastrukturen, kunne fremme salget af elektrolyse baserede brændstoffer og øge det dertilhørende behov for tilpassede køretøjer.

TEKNOLOGISKE FORBEDRINGER OG FORSKNINGSTILTAG

- **Forsættelse af forskningsaktiviteter fra forrige etape**

Det er vigtigt at fortsætte forskningsinitiativerne for at opnå den bedst mulige teknologiske udvikling. I denne forbindelse bør fokus rettes mod forgasning af biomasse, SOEC teknologi, indfangelse af CO₂ fra luft samt produktion af flybrændstof. Undersøgelser af gasnetværkets kompleksitet bør ligeledes prioriteres. Dette er vigtigt, da det ikke er sikkert, at gasnetværket i fremtiden vil spille samme rolle, som den gør i det nuværende system. Det er muligt, at forskellige gasnetværk opstår, og at disse vil facilitere implementeringen af elektrolyse og elektrofuels i systemet.

1.4 Fase 3 og 4: Markedsgennembrud – fra 2025 til 2035 og storskala udrulning i det smarte energisystem – fra 2035 og frem.

I perioden op til 2035 forventes det både at infrastrukturen til tankning er på plads, og at afprøvninger af bilflåden har været vellykkede. Dette giver muligheden for at forbedre og udvide markedet for de nye køretøjer. Endvidere kan dette komplementeres med en udvidelse af blandingsstandarderne, tilgængeligheden af forskellige brændselsblandinger på markedet samtidig med etablering af påfyldningsfaciliteter, hvor ren DME og/eller metanol vil være tilgængelig til udvalgte køretøjer. Denne fase foregår sideløbende med en opskalering af både produktionsfaciliteter og elektrolyseteknologien i sig selv. **Elektrolyseanlæggenes kapacitet forventes at være større end 50 MW_{el}**, og der vil i alt være **1000 MW_{el} elektrolyse** integreret i systemet. Efter 2035 bør hovedfokus være at implementere teknologien som en aktiv del af det smarte energisystem med henblik på dels at maksimere integrationen af vedvarende energi og dels at sikre fleksibilitet i systemet. Den konkrete udformning af markedet og dets vilkår bør baseres på de erfaringer der er gjort med testanlæggene. Det er også her sandsynligt, at der fortsat er behov for en indsats for at bringe SOEC fra pilotstadiet til kommercialisering.

AKTIVITETER RELATERET TIL DEMONSTRATION OG PLACERING AF ANLÆG.

- **Opskalering af produktionen af flybrændstof via elektrolyse**

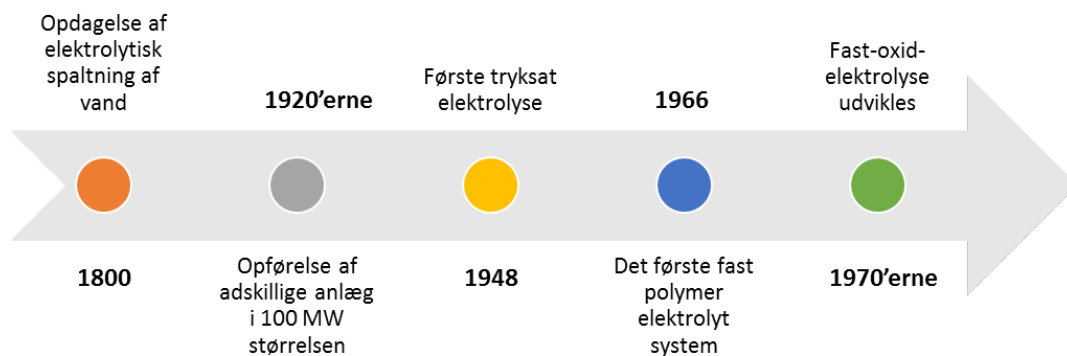
Afhængigt af teknologiens parathedsniveau på dette tidspunkt bør opskalering fra pilotprojekt til egentlige demonstrationsenheder påbegyndes. Brugen af det producerede brændsel i nogle udvalgte fly kan gennemføres i samarbejde med interesserede virksomheder, hvilket kunne opmuntre andre aktører til at deltage. Den videre udvikling af denne teknologi bør fortsættes, da denne på nuværende tidspunkt er det eneste alternativ med lavt vandforbrug og få konsekvenser for landforbrug.

- **Påbegynd pilotprojekter af de nødvendige netværk og lagringsmuligheder (flydende brændsel, midlertidig brint)**

Med den øgede produktionskapacitet i systemet er det vigtigt at undersøge, hvilken supplerende infrastruktur der vil være behov for, for samtidig at maksimere synergierne og fleksibiliteten i systemet. Afhængig af resultatet af analysen af gasnettet, kan det være nødvendigt at påbegynde pilotprojekter til afprøvning af nye netværk eller til anvendelse af gas fra elektrolyse direkte i det eksisterende gasnet. Sådanne projekter bør være i overensstemmelse med placeringshensynet for anlæg ift. den eksisterende infrastruktur i systemet. Da brugen af elektrolyse til produktion af brændstof giver mulighed for sæsonlagring, er det vigtigt at definere den nødvendige kapacitet og teste integrerede løsninger.

2 Den teknologiske status samt potentielle anvendelsesformål

I løbet af 1890'erne formåede den danske opfinder Poul la Cour, også kendt som "vindmøllepioneren", ved brug af en elektrolyseenhed drevet af vindenergi, at producere op imod 1000 liter brint og 500 liter ilt per time på en blæsende dag [36]. En efterfølgende lang tradition med dansk interesse for elektrolyse har resulteret i, at danske producenter i dag har ekspertise de bedst kendte elektrolyseteknologier. Disse teknologier er som ovenfor nævnt inddelt i tre typer: *alkalisk elektrolyse*, der bruger flydende elektrolytter, elektrolyse baseret på *PEM* og *elektrolyse baseret på SOEC*, som begge bruger faste elektrolytter. Alkalisk elektrolyse har været tilgængelig i næste 100 år, og er dermed den ældste og mest kommercialiserede teknologi efterfulgt af PEM, som er blevet kommercielt tilgængelig i løbet af det seneste årti. Den nyeste teknologi på markedet gør brug af en Anionombytnings membran. SOEC-teknologi er ikke tilgængelige på det kommercielle marked på nuværende tidspunkt, men har foreløbig været igennem nogle vellykkede demonstrationsforløb. Den historiske udvikling af elektrolyse er illustreret i Figur 5.



Figur 5. Historisk udvikling af elektrolyse. Tilpasset efter [37]

Alkalisk elektrolyse er en moden teknologi. Traditionel alkalisk elektrolyse fungerer ved normalt atmosfærisk tryk og er designet til en stationær drift i anlæg forbundet til nettet. Der findes imidlertid også alkaliske elektrolyseanlæg, der fungerer under tryk og har en meget hurtigere responstid; helt ned til 1-3 sekunder [38]. Alkalisk elektrolyse havde sin storhedstid i 1920'erne, hvor adskillige anlæg i størrelsen 100 MW_{el} blev opført. Det hidtil største realiserede anlæg på 162 MW_{el} blev bygget i 1960'erne i Aswan i Egypten. De fleste projekter fra den tidsperiode blev nedlagt i løbet af 1980'erne [39].

Alkaliske elektrolyseanlæg har en levetid på helt op til 30 år, forudsat at elektroder udskiftes hvert 7-15 år [3]. De seneste tid er interessen for alkalisk vand-elektrolyse steget igen, da denne teknologi kan anvende ikke-kostbare metaller som katalysator, samtidig med at den kan anvendes i forskellige sammenhænge [40]. Endvidere er der ved denne type teknologi – sammenlignet med PEM - et væsentligere bredere udvalg af mulige brugbare materialer, da alkalisk elektrolyse kan anvende både ædle og ikke-ædle metaller som katalysatorer. Alkaliske elektrolyseanlæg har dog tre centrale udfordringer: 1) de har en høj mindste last, 2) de skal køre under lavt tryk og 3) de har begrænset strømtæthed [41]. Renheden af den gas, der kommer ud fra konventionelle, alkaliske elektrolyseanlæg, er relativt lav sammenlignet med andre elektrolyseteknologier. Med mere avancerede anlæg, hvor den alkalisk elektrolyse foregår ved højere temperaturer, kan man dog opnå en renhed på 99,9 vol. % [3]. Normalt vil temperaturen ligge mellem 60-80 °C, men der er dog blevet eksperimenteret med endnu højere temperaturer på op mod 400°C [42]. Alkaliske elektrolyseanlæg har en ydeevne på et niveau sammenligneligt med PEM, men er kendetegnet ved at have lav strømtæthed.

I forbindelse med oliekrisen i 1970'erne steg interessen for elektrolyse igen. Den første Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) blev udviklet i 1966, og mindre PEM løsninger blev introduceret i løbet af 1970'erne til militære- og rumteknologiske formål [37]. Markedet for PEM teknologier har været voksende i det seneste årti. Så sent som i 2015 installerede Siemens i Tyskland et 6 MW_{el} PEM system, bestående af tre 2 MW elektrolyseenheder, hvilket gjorde det til det største PEM elektrolyseanlæg i verden [43]. I 2014 annoncerede Siemens, at de i samarbejde med Blue Fuel Energy ville opføre et 20 MW_{el} PEM system bestående af 16 stk 1,25 MW_{el} elektrolyseenheder. Der er dog ikke siden fremkommet yderligere informationer om dette projekt [44]. I 2017 har HyBalance planlagt at installere en 1 MW_{el} PEM elektrolyseenhed, der kan generere brint ved 230 Nm³/t, der kan anvendes til transport og som ancillary service [45]. Driftstemperaturerne for kommercielt tilgængelige PEM elektrolyseanlæg ligger mellem 65-85°C [46]. Levetiden for et PEM elektrolyseanlæg angives til at være fem år eller mere [47]. PEM elektrolyse har i sammenligning med andre teknologier et mere kompakt systemdesign, en høj spændingseffektivitet og producerer gas med en høj renhed [37]. Teknologien har også en hurtigere reaktionstid og er yderst fleksibel drift [41]. Et af problemerne med PEM er imidlertid brugen af ædelmetaller (platinmetaller), der resulterer i store udgifter til komponenter, samt problemer med ressourceknaphed på længere sigt. Høje omkostninger i forbindelse med opførelse af PEM-systemer udgør på nuværende tidspunkt en stor barriere for implementering af løsninger baseret på denne type teknologi.

Dampelektrolyse ved brug af en SOEC blev udviklet i løbet af 1970'erne, men reelle eksperimenter fandt først sted i 1980'erne [41]. Ved at køre elektrolyseanlæg ved høj temperatur, mellem 800 og 1000°C, er det muligt at opnå en højere effekt end for de andre elektrolyseteknologier [48]. Selvom SOEC teknologi endnu ikke er tilgængelig på det kommercielle marked, har teknologierne været igennem en test- og demonstrationsproces, og får på grund af deres tekniske egenskaber større og større opmærksomhed. Elektrolyse med anvendelse af SOEC fremstiller oxid-ioner, hvilket muliggør carbondioxid elektrolyse og en kombineret (co-)elektrolyse af H₂O- og CO₂. Det er hverken muligt at køre disse processer med alkalisk elektrolyse eller PEM-teknologi. Derudover er materialerne billigere end for de andre anlægstyper, idet SOEC teknologi anvender en keramisk elektrolyt. SOEC enheder har mulighed for at køre i omvendt retning, forstået på den måde, at anlæggene både kan anvendes til elektrolyse og som brændselscelle. Derfor kaldes denne teknologi også for en reversibel fastoxid brændselscelle⁶. Dette gør dem særdeles attraktive at anvende i systemer, hvori der indgår en fluktuerende energiproduktion. Samtidig er dette med til at forbedre driftsøkonomien på anlæggene, da cellerne kan anvendes i begge retninger. På nuværende tidspunkt er en af de største udfordringer med SOEC teknologien, at den har en lav holdbarhed og en kort levetid. Ydermere er balanceringen af enhedernes komponenter ved høje driftstemperaturer også udfordrende. Der har dog været demonstrationsprojekter, som har haft vellykket anvendelse af denne teknologi, men foreløbig kun på kW niveau. SOPHIA projekterne gennemfører test for at afprøve integrationen mellem en koncentreret solenergi-enhed og en 3 kW SOEC enhed sat under tryk [49]. ECo-

De seneste testprojekter i Danmark:

- ***1 MW alkalisk til el-til-gas via biologisk katalysator***
- ***1 MW PEM til reservekapaciteter, industri og transport***
- ***40 kW_{el} SOEC til opgradering af biogas***

⁶ Kaldes på engelsk Reversible solid oxide fuel cell.

projektet, der startede i maj 2016, vil over en treårig periode afprøve sam-elektrolyse⁷ processen, der muliggør en samtidig elektrolyse af damp og CO₂ [50]. I de kommende år er der i Danmark og Tyskland kun annonceret få nye demonstrationsprojekter i størrelsesordenen ~30 kW [46].

Table 1. Oversigt over identificerede elektrolyse leverandører

| Electrolyse type | Producent | Land |
|------------------|---------------------------------|-----------------|
| AEM | Acta S.p.a | Italien |
| Alkalisk | GreenHydrogen.dk | Danmark |
| Alkalisk | ELT Elektrolyse Technik | Tyskland |
| Alkalisk | McPhy | Tyskland |
| Alkalisk | Wasserelektrolyse | Tyskland |
| Alkalisk | Erredue s.r.l | Italien |
| Alkalisk | H2 Nitidor | Italien |
| Alkalisk | Idroenergy | Italien |
| Alkalisk | NEL Hydrogen | Norge |
| Alkalisk | IHT Industrie Haute Technologie | Schweiz |
| Alkalisk | PURE Energy Centre | Storbritannien |
| Alkalisk | Teledyne Energy Systems | USA |
| Alkalisk, PEM | Hydrogenics | Belgien, Canada |
| Alkalisk, PEM | SyGasTec GmbH | Tyskland |
| Alkalisk, SOEC | Toshiba | Japan |
| PEM | IRD A/S | Danmark |
| PEM | AREVA | Frankrig |
| PEM | CETH2 | Frankrig |
| PEM | H-TEC SYSTEMS | Tyskland |
| PEM | Siemens | Tyskland |
| PEM | H2 agentur/Giner | Tyskland, USA |
| PEM | Shinko Pantec | Japan |
| PEM | ITM Power | Storbritannien |
| PEM | Wellman-CJB | Storbritannien |
| PEM | LYNNTECH | USA |
| PEM | Proton OnSite | USA |
| PEM | Hamilton Sundstrand | USA |
| SOEC | Haldor Topsoe | Danmark |
| SOEC | Sunfire | Tyskland |
| SOEC | SOLIDpower | Italien |
| SOEC | Ceramatec | USA |

**Denne liste er ikke udtømmende, men er baseret på forfatterens kendskab og tilgængelig data*

⁷ På engelsk: Co-electrolysis

En oversigt over elektrolyseproducenter i Europa og USA fremgår af Tabel 1. For alle typer af elektrolyseanlæg er der talrige producenter i EU. Et omfattende studie med fokus på udviklingen af elektrolyse i EU blev udarbejdet i 2014 [6]. Heri fremgik det, at elektrolyse vil blive anvendt til energiformål, hvilket forventes at reducere omkostningerne for teknologierne, samt forbedre deres ydeevne.

Sideløbende med de førnævnte demonstrationer af de forskellige elektrolyseteknologier, er der blevet gennemført mange andre demonstrationsprojekter i relation til P2G eller P2L koncepterne. Tyskland har, som Europas førende nation inden for P2G teknologier, investeret 57,2 M€ [51] i sådanne projekter og har udført 17 pilot- og demonstrationsprojekter i løbet af de seneste 10 år. Det første pilotprojekt med el-til-metan blev igangsat i Tyskland i 2009, mens flere projekter blev igangsat i 2012 [52]. De fleste andre EU-lande fokuserer på anvendelse af elektrolyse til brintproduktion, mens Tyskland og Danmark er førende inden for at demonstrere anvendelse af elektrolyse til produktion af gas og flydende brændstof. På nuværende tidspunkt er der syv igangværende demonstrationsprojekter i Danmark, hvoraf tre af disse er på stor skala. I forbindelse med BioCat projektet anvendes brint fra alkalisk elektrolyse til biologisk metan dannelse og den første metan blev produceret i april 2016 [53]. SOEC-teknologien er i Foulum projektet blevet testet i 6 måneder. Her bliver brint produceret ved elektrolyse brugt til at opgradere CO₂ fra biogas [17]. I Bailera et al. præsenteres en detaljeret liste over alle P2G projekter fra 2010 til i dag [54].

Der eksisterer i dag to P2L anlæg: 1) George Olah anlægget på Island, som producerer metanol fra CO₂ og brint fra alkalisk elektrolyse [9], og 2) et værk i Dresden, som producerer diesel fra CO₂ og brint [10]. Sidstnævnte anlæg var det første til at demonstrere brug af SOEC teknologi til at producere brændsel. Den samme virksomhed, Sunfire, planlægger at udvikle et anlæg med sammensatte elektrolyseenheder sat under tryk med en kapacitet på 200 kW. En sådan vil være velegnet til integration af metan-reaktorer og P2L enheder [52]. Et nyt projekt baseret på emissions-til-væske teknologi startede på Lünen kulkraftværket i januar 2015. Her vil CO₂ udledningen fra kulkraftværket sammen med brint blive omdannet til metanol. Driften af kulkraftværket forventes igangsat i 2017 [11]. På det svenske stålværk ved Luleå har man annonceret et nyt P2L projekt finansieret af samme investorer, som var involveret i George Olah værket på Island, hvor CO₂ indholdet i overskudsgasser fra en højovn blev omdannet til flydende brændsler [55].

Den beskrevne teknologiske status er baseret på viden om eksisterende og planlagte projekter på demonstrations- til kommercielt niveau. Der opstår flere og flere nye koncepter og planlagte demonstrationer inden for produktionen af flydende brændsler ved brug af P2L teknologier. Denne hastige udvikling gælder selv for de mere avancerede koncepter. For eksempel har den Schweiziske virksomhed Climeworks, konstrueret et værk i industriel skala til at indfange atmosfærisk CO₂ og denne startede dens egentlige drift i 2016 [56]. Baseret på nuværende driftsresultater fra værket stiler virksomheden efter at kunne levere kulstof indfanget fra luften til P2G og P2L anlæg. Climeworks har allerede afprøvet denne mulighed i samarbejde med virksomheden Sunfire på deres projekt i Dresden [57]. Den samme ide forfølges også af to andre virksomheder, Global Thermostat i USA og Carbon Engineering i Canada. I Finland vil VTT Technical Research Center oprette et transportabelt pilotanlæg, der i et kompakt system producerer flydende brændstof baseret på indfanget atmosfærisk CO₂ og brint frembragt ved elektrolyse. Det tyske Karlsruhe Institute of Technology (KIT) har ligeledes konstrueret et nyt kompakt system [58].

Brint anvendes allerede direkte i transportsektoren, og der er i Europa mere end 500 køretøjer, der anvender på dette drivmiddel [59]. I forlængelse heraf er der for nyligt givet bevilling til et program, der gennem en seksårig periode skal sikre en videre udvikling af denne teknologi med 1,200 nye køretøjer og 200

optankningsstationer [60]. Et køretøj med en brintbrændselscelle er i princippet et el-køretøj. Forskellen er, at det forrige kører på el produceret fra brint, der er lagret i bilen, hvor det senere kører på el, der er opladet i et batteri. Som reaktion på et EU direktiv fra 2014 [61], der omhandler opbygningen af ny infrastruktur til at fremme anvendelsen af alternative brændsler, inklusiv brint, er en række lande begyndt at investere i denne teknologi. Tyskland har ambitioner om at være det første land med et grundlæggende netværk af stationer til påfyldning af brint. Tyskland planlægger ligeledes, at det første brintdrevne passagertog skal tages i brug i december 2017 [62]. Danmark har i øjeblikket ti brinttankstationer jævnt fordelt over hele landet samt 64 køretøjer med brint-brændselsceller [63]. I København er der ydermere en speciel reduceret parkeringsafgift for el-køretøjer og brintbiler, som er syv gange billigere end for konventionelle køretøjer.

Industrien har anvendt brint i mange år, men elektrolytisk brint er hovedsageligt blevet anvendt i de tilfælde, hvor det er omkostningseffektivt, eksempelvis i forhold til el omkostninger. Elektrolytisk brint anvendes hovedsageligt til kunstgødning- og ammoniakproduktion samt i forskellige dele af fødevarerindustrien. Det største elektrolyseanlæg har været anvendt til kunstgødningsproduktion [6]. Det er dog ikke forventeligt, at brint produceret på elektrolyse fremover vil være konkurrencedygtig til industrielle formål, da dets brug i transportsektoren er mere værdifuldt.

3 Interessenters vision for elektrolyse

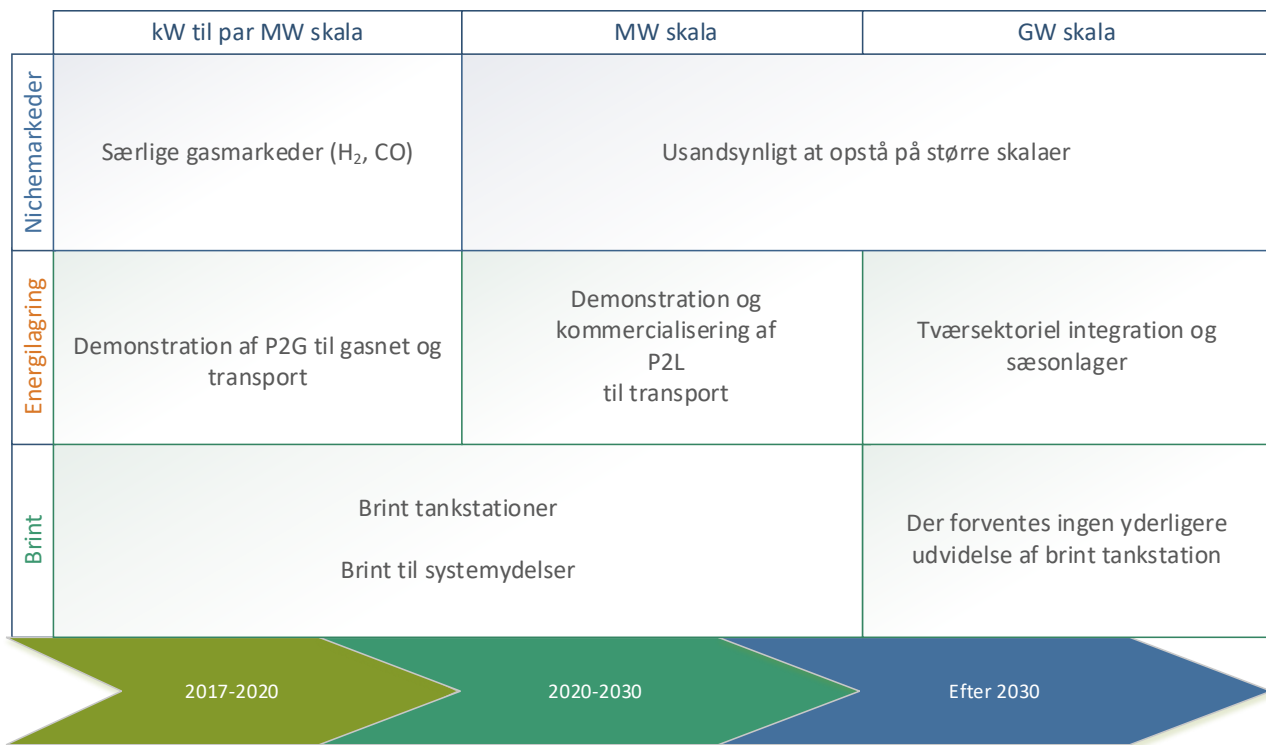
Dette afsnit giver et yderligere overblik over forskellige interessenters visioner inden for elektrolyse, både i det nuværende og i det fremtidige energisystem. Afsnittet er baseret på en række interviews med relevante interessenter, herunder forskere og repræsentanter fra de virksomheder, der har investeret i eller har været en del af demonstrationsprojekterne. Et overblik over de interviewede interessenter fremgår i denne rapportes Forord. En opsummering af aktørernes visioner er illustreret i Figur 6.

Der er generel enighed blandt interessenterne om, at elektrolyse med sikkerhed vil spille en rolle i det fremtidige energisystem, og at brug af elektrolyse kan skabe en vigtig kobling mellem el- og transportsektoren. Den begrænsede tilstedeværelse af anvendelige og kommercielle teknologier til elektrolyse på markedet skyldes, at der endnu ikke er tilstrækkelig stort behov for teknologien i det nuværende energisystem. Derfor vil introduktionen af elektrolyse på den korte bane ske på gasmarkeder for specialiserede anvendelser og til industrielle formål. Teknologien bliver i mange tilfælde opfattet som en fremtidsteknologi, da der ikke er noget stort behov for den lige nu. Af samme grund er der ikke etableret stabile politiske rammer for teknologien, hvorfor introduktionen til markedet sker yderst langsomt. Den hastighed, hvormed elektrolyse vil blive implementeret, afhænger af prisudviklingen på elektricitet, da denne post, ifølge flere interessenter, anses som værende den største udgift ved elektrolyse.

Den potentielle brug af elektrolyse kan opsummeres til tre områder: 1) nichemarkeder, 2) direkte brug af brint og 3) energilagring. Brugen af elektrolyse på nichemarkeder er allerede påbegyndt, mens brugen til industrielle formål fortsat vokser langsomt. Der er nichemarkeder for specialiserede gasser, hvor det eksempelvis gennem anvendelsen af SOEC teknologi er muligt at lave CO₂ elektrolyse og fremskaffe ren CO til industrielle formål. Det er dog ikke forventeligt, at dette marked vil vokse nævneværdigt i fremtiden. Brugen af brint til ancillary services er blevet mere attraktivt og den første demonstration i stor skala i Danmark påbegyndes i 2017. Det forventes ikke, at investeringer i elektrolyse alene vil være til dette formål, men snarere at muligheden for levere reservefunktioner vil være en yderligere fordel ved at bruge elektrolyse til brændselsproduktion eller ved at opgradere biogas med brint. Dette afhænger dog af driftsform og tidspunkt. Reservekapaciteter kan være en ekstra indtægtskilde, men investeringer i teknologien bør ikke have som eneste formål at indgå som reserve på balancemarkedet, da dette udgør en urentabel business case [64].

De første skridt imod at forøge andelen af elektrolyse-baserede produkter på markedet vil på kort sigt - indtil 2020 - blive at øge anvendelse af brint til transportformål samt sætte gang i etablering af den nødvendige infrastruktur til påfyldning af dette brændstof. Selvom produktionen af brint baseret på vedvarende energi ikke er en del af reguleringen omhandlende udrulning af brintinfrastrukturen, forventes det stadig, at en vis mængde brint vil blive tilvejebragt gennem elektrolyseenheder ved påfyldningsstationer. Det langsigtede fokus for implementering af elektrolyse vil ske i forbindelse med produktion af flydende- og gasholdige brændsler med det formål at virke som lagre for energi. Dette skal ses som en følge af, at det forudses, at kun en begrænset mængde biomasse vil være tilgængelig til energiformål, samt at der vil være behov for nye koncepter inden for brændselsproduktion, som konverterer elektricitet fra vedvarende energikilder til kemisk energi, som kan lagres. P2G og P2L teknologier med integreret elektrolyse anses som for at være vigtige systemer efter 2020. Med flere planlagte testprojekter i de kommende år forventes det, at der i

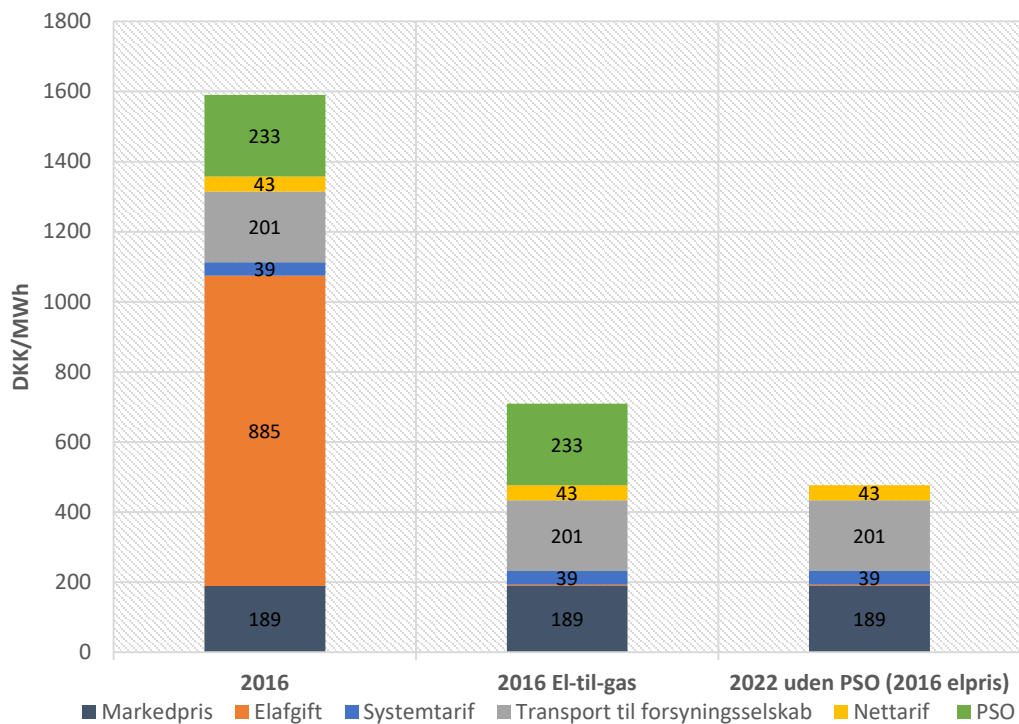
midten af 2020'erne vil ske en kommerialisering. På den lange bane vil elektrolyse, som teknologi til integration mellem sektorer og som sæsonbestemt lagring, forhåbentligt være moden efter 2030.



Figur 6. Elektrolyses rolle baseret på interessent input

Figuren illustrerer den forventede skala der i fremtiden vil blive opnået med de forskellige teknologier. Det fremgår således, at MW og GW skala formodes at være forbeholdt energilagring, mens andre anvendelsesmuligheder forventes at forblive i mindre skala. Det forventes, at de centraliserede elektrolyseanlæg, grundet stordriftsfordele, vil blive anvendt til produktion af flydende brændsel, mens gasproduktion og andre anvendelsesmuligheder forventes anvendt til decentral produktion tilknyttet lokale gasnetværk.

De adspurgte interessenter er enige om, at implementering af elektrolyse på nuværende tidspunkt ikke lader sig gøre pga. elprisen. Strukturen på elprisen fremgår af Figur 7, som er baseret på de gennemsnitlige elpriser og tariffer i 2016. Statstariffen udgør mere end halvdelen af den totale pris. Størstedelen af denne kan imidlertid refunderes, da elektriciteten bliver anvendt til procesforbrug. Den totale pris kan således blive reduceret med 44 %. Efter denne reduktion udgør PSO'en en tredjedel af prisen. Regeringens plan er at fjerne PSO'en før 2025 gennem en gradvis afskaffelse, som begynder i 2018 [65]. Dette kan bidrage til at gøre investeringer i elektrolyse mere attraktive. Ifølge [46] kunne der opstå yderligere fordele, hvis pågældende anlæg er forbundet til dets egen elproduktion. Dette er dog ikke nødvendigvis realistisk eller nødvendigt, hvis PSO'en bliver fjernet.



Figur 7. Elprisstruktur før og efter statslige elafgifter samt uden PSO afgifter

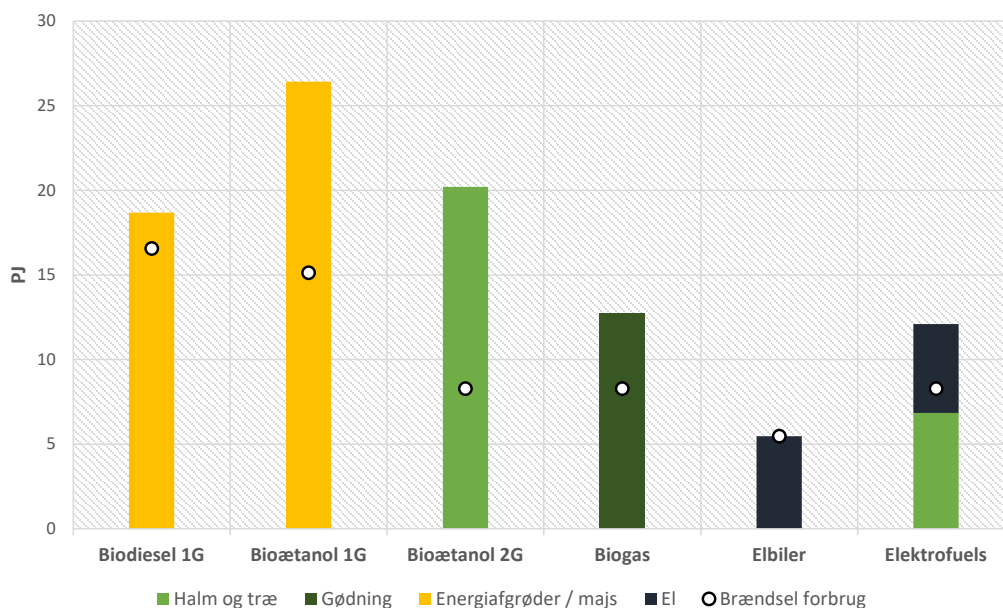
Der er ligeledes enighed blandt interessenterne om behovet for mere forskning og flere demonstrationsprojekter for SOEC teknologien. Derudover er de enige om, at den kommercialiserede alkalisk elektrolyse og også PEM teknologien bør prioriteres inden for de ønskede anvendelsesområder. Dette er essentielt både i forhold til at opnå den nødvendige teknologiske erfaring, men også for at kunne reducere de relativt høje teknologiske omkostninger. For at sikre fremtidige investeringer er der behov for at få skabt et marked for lagring af elektricitet samt et behov for politisk handling med en tilhørende klar politisk retning. Den manglende opskalering af teknologierne er resultat af de nuværende investerings- og driftsomkostninger, snarere end de egentlige tekniske udfordringer, som de fleste interessenter i øvrigt er enige om burde kunne løses.

Danmark bør blive bedre til at tiltrække private investorer. Den høje andel af vindenergi i energiproduktionen gør Danmark til et favorabelt sted for afprøvning af de forskellige elektrolyseteknologier. Danmark vil kunne profilere sig selv både som producent af elektrolyseteknologi og som førende inden for implementering af teknologien, idet det forventes, at teknologien vil blomstre op i løbet af det kommende årti. Der skal dog tages højde for, at det kan være udfordrende at være teknologiproducent, da det enten er meget dyrt grundet høje produktionsomkostninger, eller, såfremt man ikke producerer lokalt, er det svært at tilpasse sig den teknologiske udvikling, som kan gå i retning mod andre teknologier.

4 Energisystemer og elektrolyse: fremskrivninger mod 2020 og 2050.

Elektrolyse anerkendes - om end i variabel grad - i næsten alle danske planer for det fremtidige energisystem som værende en vigtig del af systemet. Derfor er det vigtigt med en nærmere undersøgelse af, hvad der skal til for at realisere disse fremtidsplaner, og hvordan dette relaterer sig til elektrolyses stigende rolle på markedet.

Ifølge Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2009/28/EF, skal alle medlemsstater sikre, at 10% af staternes transportsektors energibehov kommer fra vedvarende energikilder [66]. Danmark ikke er førende inden for initiativer relateret til en sådan omstilling og med kun få år til at realisere dette mål er det vigtigt at undersøge, hvilke scenarier eksisterer, samt hvilke af disse passer ind i den langsigtede planlægning. Som tidligere nævnt kan elektrolyse bruges til produktion af brændsel til transportformål, hvorfor denne løsning i et tidligere studie blev sammenlignet med andre alternative løsninger, som kunne anvendes til at realisere de kortsigtede målsætninger for transportsektoren [64]. Resultaterne fra dette studie er vist i Figur 8 forneden og illustrerer det afledte energi- og ressourceforbrug ved at opfylde målet om 10% vedvarende energi i transportsektoren ved anvendelse af forskellige brændsler. Dette inkluderer effekten af lovgivningen [66] for forskellige typer af brændstof⁸.



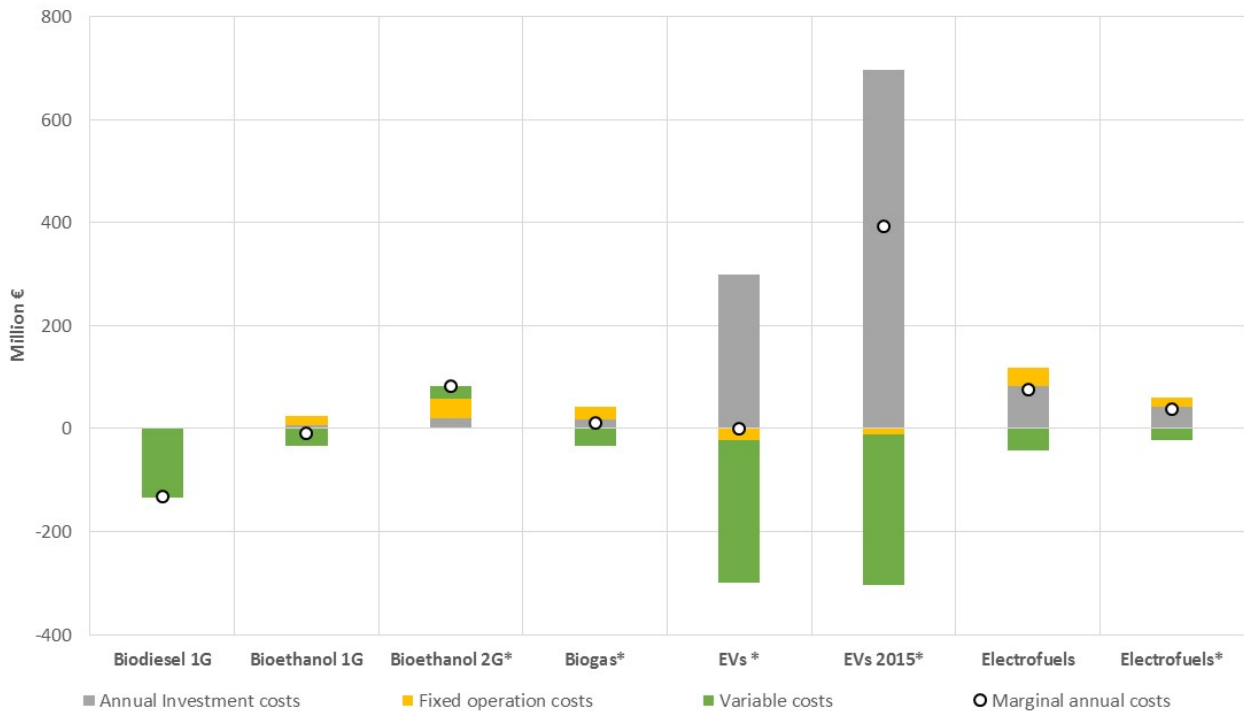
Figur 8. Energibehov ved forskellige brændsler og deres ressourcer til at omstille 10% af transportsektoren til vedvarende energi [64]

Hvis 10% af efterspørgslen på flydende brændstoffer skal mødes ved brug af anden-generation bioetanol, hvor der indregnes en faktor to, medfører dette udnyttelse af 20% af den danske biomasse ressource [67], mens brug af første generation bioætanol vil betyde en 13% udnyttelse af denne ressource. Dette er kritisabelt i forhold til den langsigtede planlægning, da nuværende beslutninger i denne retning kan medføre, at vi bliver fastlåst til én bestemt teknologi, som ikke kan møde den fremtidige efterspørgsel og hvilket i sidste

⁸ Brændstoffer produceret på biomasse, anden generation bioetanol, biogas og elektrofuels er i tråd med [66] korrigeret med en faktor to, mens der for el-køretøjer, hvis elforbrug er baseret på vedvarende energikilder, er korrigeret med en faktor fem.

ende kan resultere i overforbrug af biomasse. El-køretøjer er et mere effektivt alternativ til olieforbrug i persontransport end etanol brændsler. Biomassepotentialer er en begrænset ressource og bør prioriteres til de dele af systemet, hvor det er mest nødvendigt. Ved at anvende elektrolyse til brændselsproduktion kan biomasseforbruget reduceres til 10% i den situation, hvor lovgivningens faktor to korrigeringsfaktor ikke er tilstede. Elektrolyse kan fremmes yderligere i fremtiden og fuldstændig erstatte behovet for biomasse til produktion af brændstof ved at anvende CO₂-ressourcer direkte fra kulstof genanvendelsesprocesser [64].

Omkostningerne for de forskellige muligheder for produktion af brændstof er illustreret i Figur 9 forneden.

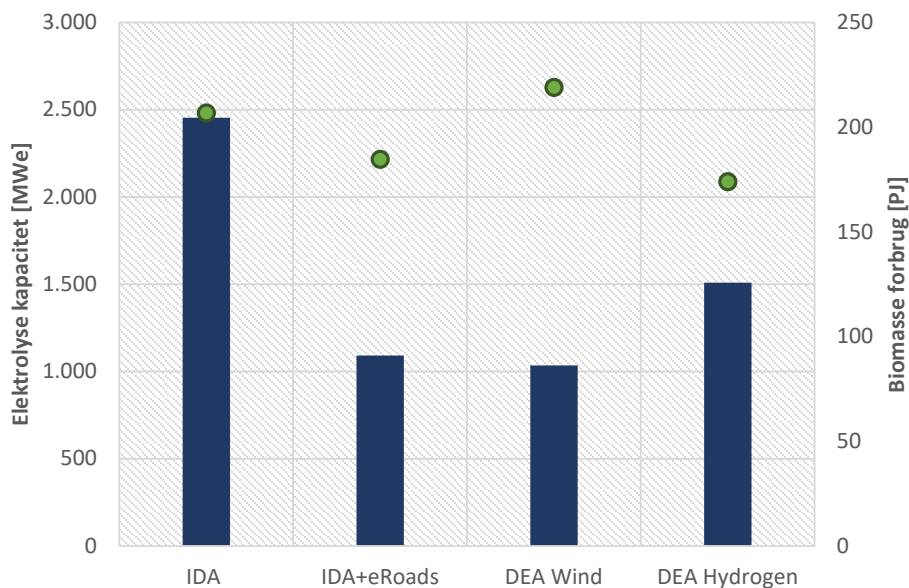


Figur 9. Marginale omkostninger for forskellige brændselstyper i sammenligning med ingen vedvarende brændsler i transportsektoren. (*talt dobbelt for brændsler fra halm eller gylle ifølge [66] og faktor fem for elbiler)

Omkostningerne udgør marginalomkostninger sammenlignet med ikke at have noget vedvarende energi i transportsektoren. Ifølge omkostningsantagelserne for 2015 fremgår det af figuren, at den dyreste løsning er el-køretøjer. Dog fremgår det af omkostningsantagelserne for 2020, at el-køretøjer vil være den tredje dyreste løsning efter 1G biodiesel og bioetanol. Med de beskrevne problemstillinger ved brugen af biomasse i mente kan vi konkludere, at el-køretøjer er den bedste løsning, selvom de danske fremskrivninger er meget konservative, nærmest på grænsen til, hvad der kunne fortolkes som skeptiske. For at møde målsætningen om 10% vedvarende energi i 2020 udelukkende ved brug af el-køretøjer, er der behov for 400.000 køretøjer. Energistyrelsen har projekteret, at der i Danmark i 2020 vil være 6.000 køretøjer [68]. Der er dog som resultat af den ændrede regulering for el-køretøjer, der blev implementeret i 2016, sket en markant stigning i andelen af el-køretøjer, hvor andelen i perioden juni 2015 til december 2015 steg fra 4.523 til 7.842 [69]. Salgstallene faldt dog markant i 2016 og i starten af 2017 var der 8.013 køretøjer registreret i Danmark. Danmark har ingen mål om at øge andelen af el-køretøjer, mens der til sammenligning i Norge er en målsætning om at nå 50.000 køretøjer inden udgangen af 2018. Der er dog allerede i år 100.000 el-køretøjer på vejene i Norge, hvoraf 17% er fremstillet af Tesla. Danske politikere har i stedet valgt at fokusere mere på den biomasseintensive bioetanol [70].

Det fremgår ligeledes af figuren, at elektrofuels ligger på samme omkostningsniveau som bioetanol, men brugen af biomasse til disse brændsler er væsentlig lavere. Derfor bør disse brændsler anses som den foretrukne løsning. Biogas er også en attraktiv løsning, men er ikke velegnet til at møde den store efterspørgsel grundet dets lave potentiale [4]. De beslutninger, der bliver truffet i løbet af de næste fem til ti år, er altafgørende, da de enten kan åbne eller lukke døren for de teknologier, som bliver nødvendige i fremtiden.

Trods svage initiativer fra regeringen hvad angår implementeringen af elektrolyse, forudser energisystem fremskrivninger, at elektrolyse vil blive anvendt i det fremtidige danske energisystem i 2050. To IDA scenarier (IDA Energy Vision, "IDA", og IDA Energy Vision+Electric Roads⁹, "IDA+eRoads") samt to scenarier fra Energistyrelsen (Vind og Brint scenarierne) blev sammenlignet for at afgøre hastigheden på elektrolyses markedsoptag og dermed afgøre den projekterede retning for denne teknologi [4,71]. Alle fremskrivninger indeholder elektrolyse i transportsektoren, da det synes at være den bedst egnede sektor for teknologien. Dette er i overensstemmelse med interessenternes bud på, hvor elektrolyse bør anvendes på lang sigt. Da der på nuværende tidspunkt ikke er implementeret nogen elektrolysekapacitet til transportformål, er startåret 2016 markeret med 0 MW i installeret kapacitet. Fremskrivningerne varierer i forhold til nødvendig elektrolysekapacitet for at kunne møde efterspørgslen på brændstof til transport og i forhold til hvilken teknologi elektrolysen er tilkøbet for at producere brændsel. Derfor ses der variationer i biomasseforbruget for de forskellige fremskrivninger (Figur 10).



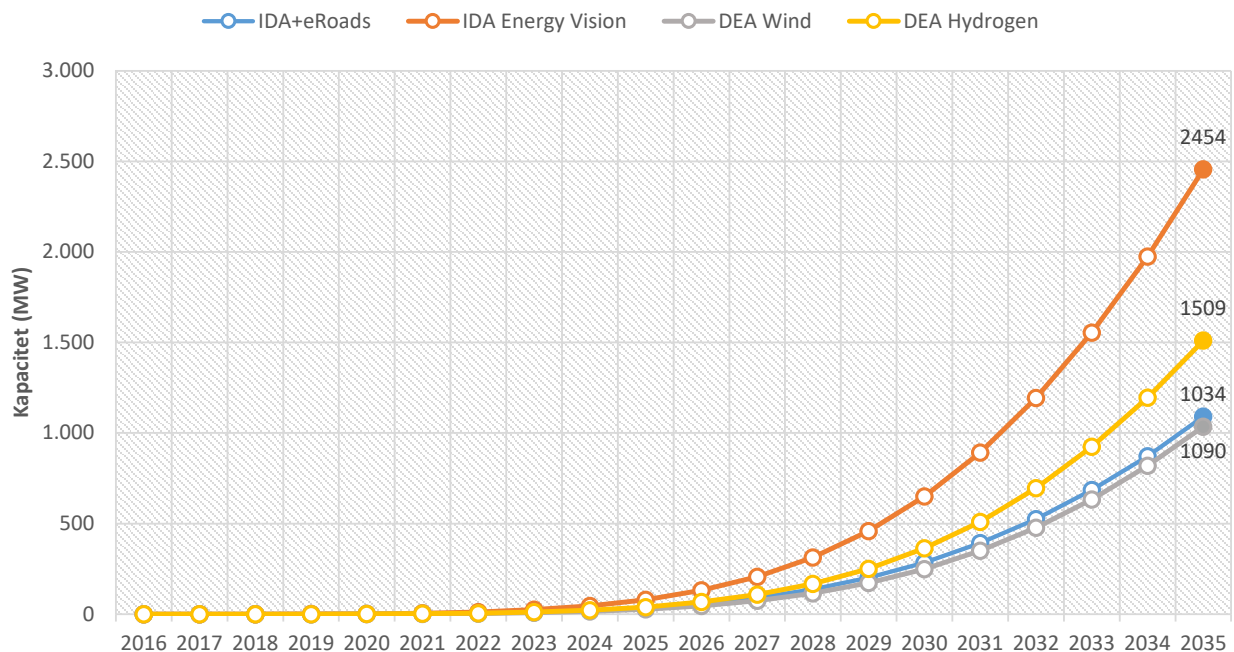
Figur 10. Elektrolysekapacitet (blå søjler) og biomasseforbrug (grønne cirkler) i forskellige fremskrivninger

IDA fremskrivningen har den højeste kapacitet af installeret elektrolyse, hvorfor IDA+eRoads scenariet blev lavet. I IDA+eRoads projekteringen er det antaget, at 20 % af efterspørgslen efter flydende brændstof kan erstattes af eRoad konceptet. eRoad konceptet bliver mere og mere attraktivt, da det tilbyder yderligere muligheder for direkte elektrificering af transportsektoren. Prisen på batterier i el-køretøjer udgør den største andel af omkostningerne for køretøjerne, hvorfor investeringsomkostningerne kan reduceres

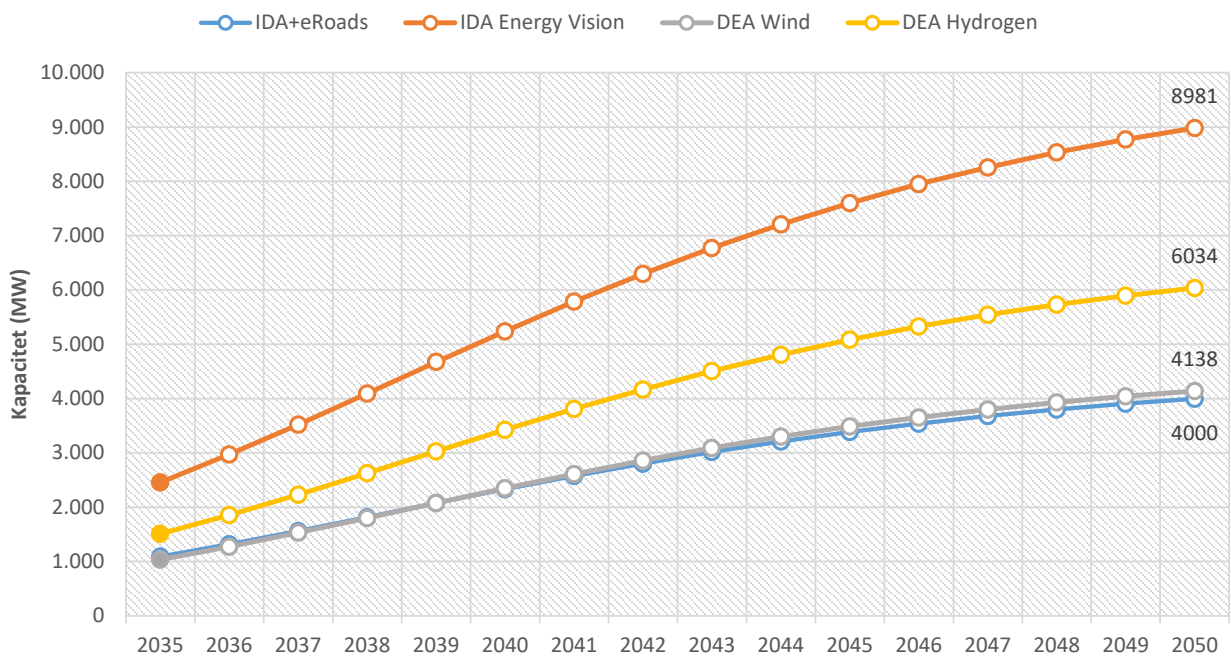
⁹ Electric Roads (eRoads) konceptet bygger på elektrificering af veje, så køretøjer kan forsynes direkte med el på farten, tilsvarende eksisterende tog og sporvognbusser [72].

betydeligt ved en direkte elektrificering, da behovet for batterier fjernes [72]. Ved at tilføje eRoad konceptet til den originale IDA fremskrivning er behovet for elektrolysekapacitet blevet reduceret kraftigt. Grundet den nuværende status på teknologien anvendes der både i IDA og IDA+eRoads fremskrivningerne alkalisk elektrolyse i 2020 og SOEC teknologi i 2035, mens begge projekteringer fra Energistyrelsen er udregnet med brugen af alkalisk elektrolyse.

For at realisere fremskrivningerne er der behov for en kraftig forøgelse af brugen af elektrolyse i energisystemet. Figur 11 viser omstillingskurven for elektrolyse for de fire fremskrivninger fra 2016 og til 2035 og Figur 12 viser omstillingen fra 2035 til 2050. For at lave kurverne er der brugt tre-systems dimensioner for omstilling, som beskrevet i [73]. Det kan ses, at de projekterede elektrolysekapacitet i 2035 medfører, at nogle af kurverne er stejlere end andre. Installationen af elektrolyse er nødt til at accelerere i begyndelsen af 2020'erne, hvis nogle af fremskrivningerne skal realiseres. Vi kan se, at efter perioden med stigende antal installationer i 2020'erne og 2030'erne vil der følge en periode med stabilisering i 2040'erne. Det vil være nødvendigt at reducere teknologiens omkostninger for at opnå udrulning på så stor skala.

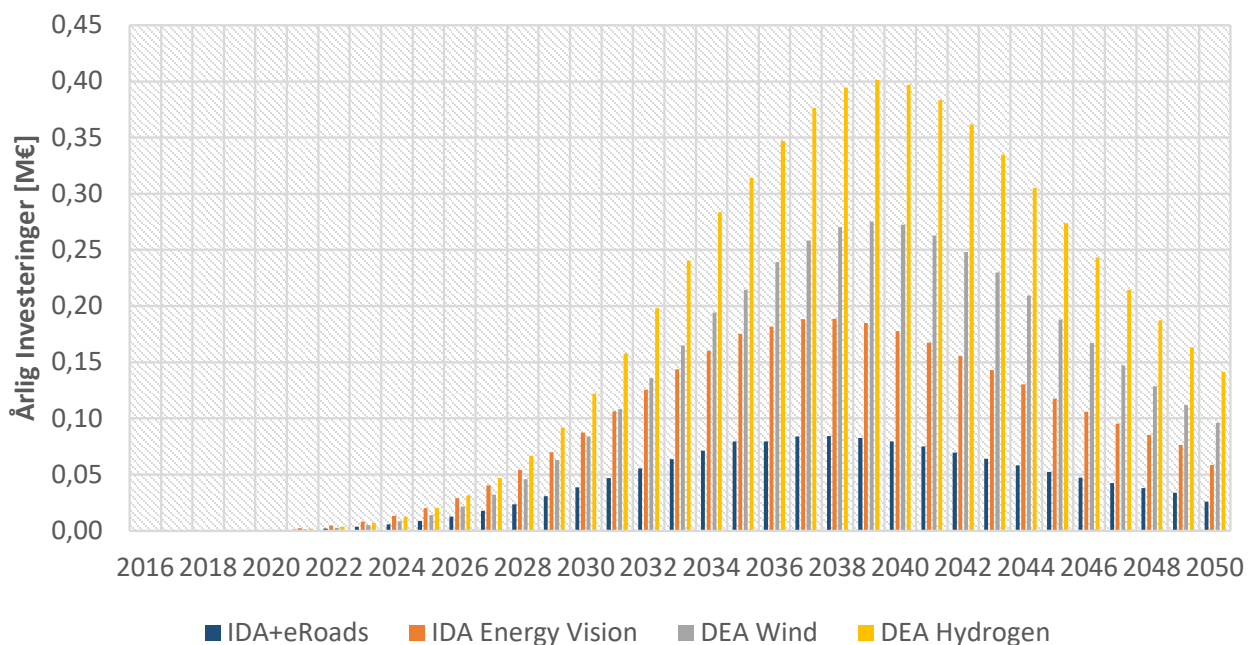


Figur 11. Installeret elektrolysekapacitet fra 2016 til 2035, inklusive de endelige 2035 værdier



Figur 12. Installeret elektrolysekapacitet fra 2035 til 2050, inklusive de endelige 2050 værdier

For at opnå disse kapaciteter er der behov for politisk opbakning, der kan fremme investeringer. Figur 13 viser investeringerne i elektrolyse per år baseret på fremskrivningerne. Prisen på alkaliske elektrolyseanlæg fra [74] blev anvendt til Energistyrelsens scenarier, og for IDA scenarierne blev denne pris også brugt frem til 2035, mens SOEC priser blev brugt for 2035 og frem [75]. Som det fremgår af figuren, vil de fleste investeringer blive gennemført op til 2040, mens der derefter vil være et fald i andelen af investeringer som resultat af færre installationer i ny kapacitet.



Figur 13. Årlige investeringer i elektrolyse for forskellige scenarier

5 Perspektivering

Lagring af elektricitet er en forudsætning for fremtidens energi systemer, da disse vil være baseret på fluktuerende vedvarende energikilder. Lagring af elektricitet på batterier er generelt meget dyrere end lagring af varme og kemiske substanser. Derfor vil det være en stor fordel at anvende vedvarende elektricitet til at producere flydende eller gasholdige brændsler, der kan lagres meget billigere. Dette vil dels reducere omkostningerne og dels bidrage med at skabe fleksibilitet i energisystemet, hvilket der er stort behov for. Elektrolyse er således et vigtigt element i udviklingen af det fremtidige energisystem, idet elektrolyse ikke alene bringer den ønskede og nødvendige fleksibilitet, men også kan bidrage med bæredygtige alternativer til transportsektoren. P2G og P2L koncepter baseret på elektrolyse har et meget mindre vand- og arealforbrug, sammenlignet med tilsvarende brændsler baseret på biomasse eller biogas. Derudover har elektrolyse også mindre forbrug af biomasse end de andre alternativer. Der har dog i længere tid hersket en misforståelse om, at elektrolyse som teknologi har været på et meget lavt parathedsniveau, samt at teknologien er langt bag andre teknologiske alternativer. Dette har desværre besværliggjort udviklingen af teknologien og dens implementering på stor skala. Det vurderes her, at disse teknologier i dag ikke alene er på niveau med en hvilken som helst af de alternative løsninger, men at elektrolyse også har en del flere fordele i forhold til bæredygtighed.

De interviewede interessenter og de nævnte fremskrivninger anser elektrolyse som en vigtig del af vores energisystem. Teknologien er dog ikke planlagt til at have en rolle i det nuværende system, da systemet formår at levere den nødvendig fleksibilitet til den nuværende andel af vedvarende energi. Dette billede vil ikke desto mindre ændre sig i takt med, at andelen af fluktuerende vedvarende energikilder øges, da dette vil skabe manglende fleksibilitet, som må blive kompenseret med lagrings- og konverteringsteknologier; et såkaldt smart energisystem. I dette vil P2L og P2G koncepter spille en stor rolle, da de bidrager til fleksibiliteten af systemet, samtidig med at de udgør en bæredygtig løsning til transportsektoren. Der er et stort potentiale i disse teknologier - specielt dem der er baseret på CO₂ udledninger og produktion af flybrændstof. Uden de rigtige politiske rammevilkår bevæger teknologien sig så langsomt ind på markedet, at det er næsten umuligt at realisere fremskrivningerne for energisystemet.

Denne handlingsplanen er opdelt i fire dele, der tilsammen beskriver en række aktiviteter, som er nødvendige for at implementere elektrolyseenheder til produktion af transportbrændstoffer, herunder skabelse af et marked for denne teknologi såvel som en omstrukturering af elmarkedet for at støtte omstillingen. Målet er at profilere Danmark som en vigtig aktør i elektrolyse- og elektrofuel produktion, da landet med den eksisterende høje andel af vedvarende energikilder har en fremragende mulighed for at være testcenter for integration af vedvarende energi og balanceteknologier. Demonstrationsenheder, som udforsker synergien af processerne og driften af kombinerede konceptanlæg for produktion af brændstof skal prioriteres. Fremtidige usikkerheder forbundet med naturgasnettet samt behovet for udviklingen af ny infrastruktur i energisystemet skal undersøges nærmere.

Det er dog vigtigt at nævne, at brændselssyntese faciliteter, der er en del af P2L konceptet, er omfattet af stordriftsfordele. Endvidere er der en bekymring for ikke at være i stand til at levere ressourcer til at møde efterspørgslen på brændstof, hvad enten det er i form af gødning, biomasse, CO₂ kilder såvel som elektricitet til elektrolyse. Derudover er det vigtigt at udvikle vores system på en sådan måde at det ikke skaber endnu en fastlåst situation i, hvor vi grundet behovet for indfangning af CO₂ eller elektricitet fortsætter med at

levere elektricitet fra anlæg drevet med fossilt brændstof og indsamler CO₂ fra disse, da en sådan udvikling hverken bidrager til at realisere målene for vedvarende energi eller til at opnå det niveau af bæredygtighed, som vi ønsker.

6 Referencer

- [1] Ridjan Skov I, Vad Mathiesen B. Danish roadmap for large-scale implementation of electrolysers. Copenhagen: 2017.
- [2] Stojić DL, Marčeta MP, Sovilj SP, Miljanić ŠS. Hydrogen generation from water electrolysis—possibilities of energy saving. *J Power Sources* 2003;118:315–9. doi:10.1016/S0378-7753(03)00077-6.
- [3] Bhandari R, Trudewind CA, Zapp P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *J Clean Prod* 2014;85:151–63. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
- [4] Mathiesen BV, Lund H, Hansen K, Ridjan I, Djørup S, Nielsen S, et al. *IDA’s Energy Vision 2050*. Copenhagen: Aalborg University; 2015.
- [5] Danish Energy Agency. *Energiscenarier frem mod 2020, 2035 og 2050 (Energy Scenarios towards 2020, 2035 and 2050)*. Copenhagen, Denmark: Danish Energy Agency; 2014.
- [6] Bertuccioli L, Chan A, Hart D, Lehner F, Madden B, Standen E. *Development of Water Electrolysis in the European Union. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*; 2014.
- [7] Dornburg V, van Vuuren D, van de Ven G, Langeveld H, Meeusen M, Banse M, et al. Bioenergy revisited: key factors in global potentials of bioenergy. *Energy Environ Sci* 2010;3:258–67.
- [8] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38:2039–61. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.010.
- [9] Carbon Recycling international. George Olah Renewable Methanol Plant 2012. http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=8&lang=en.
- [10] Beckman K. World’s first power-to-liquids production plant opened in Dresden 2014. <http://www.energypost.eu/worlds-first-power-liquids-production-plant-opened-dresden/>.
- [11] Carbon Recycling International. Carbon Recycling International Partners with EU Firms for Power to Fuel Development 2015. http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=67%3Acric-partners-with-eu-firms-for-power-to-fuel-development-&catid=2&Itemid=6&lang=en (accessed February 9, 2015).
- [12] Lund H, Østergaard PA, Connolly D, Ridjan I, Mathiesen BV, Hvelplund F, et al. Energy Storage and Smart Energy Systems. *Int J Sustain Energy Plan Manag* 2016;11:3–14. doi:10.5278.
- [13] Energinet.dk. Electricity generation in 2015 n.d. <http://www.energinet.dk/EN/KLIMA-OG-MILJOE/Miljoerapportering/Elproduktion-i-Danmark/Sider/Elproduktion-i-Danmark.aspx> (accessed January 3, 2017).
- [14] Mathiesen BV, Lund H, Connolly D, Wenzel H, Østergaard PA, Möller B, et al. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Appl Energy* 2015;145:139–54. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
- [15] Lund H. *Renewable Energy Systems : A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*. vol. 2. Burlington, USA: Academic Press; 2014.

- [16] Reinaud J, Clinckx N, Ronzeau K, Faraggi P. Scaling up innovation in the Energy Union to meet new climate, competitiveness and societal goals - Scoping the future in light of the past. 2016.
- [17] Energiforskning.dk. El-opgraderet biogas | Energiteknologiske forskningsprojekter 2013. <http://energiforskning.dk/en/node/7155> (accessed March 10, 2015).
- [18] Energinet.dk. Biogas i tal n.d. <http://www.energinet.dk/DA/GAS/biogas/Om-biogas/Sider/Biogas-i-tal.aspx> (accessed January 14, 2017).
- [19] KIC InnoEnergy. Energy from Chemical Fuels. Strategy and Roadmap 2015-2019. Eindhoven: 2015.
- [20] BioCat Project. Power-to-gas via Biological Catalysis (P2G-BioCat) 2014. <http://biocat-project.com/> (accessed October 29, 2015).
- [21] Wittrup S. Dong lukker sit højt profilerede forgasningsanlæg til 150 millioner kr. n.d.
- [22] Energi G. Gothenburg Biomass Gasification Project, GoBiGas n.d.;<http://www.energi-g.com/>
- [23] Knudsen JN, Jensen JN, Vilhelmsen P-J, Biede O. Experience with CO₂ capture from coal flue gas in pilot-scale: Testing of different amine solvents. *Energy Procedia* 2009;1:783–90. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.104.
- [24] Around the world in 22 carbon capture projects | Carbon Brief n.d. <https://www.carbonbrief.org/around-the-world-in-22-carbon-capture-projects> (accessed March 3, 2017).
- [25] Lomax G, Lenton TM, Adeosun A, Workman M. Investing in negative emissions. *Nat Clim Chang* 2015;5:498–500.
- [26] Schmidt P, Weindorf W, Roth A, Batteiger V, Riegel F. Power-to-liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Munich: 2016.
- [27] Pérez-Fortes M, Schöneberger JC, Boulamanti A, Tzimas E. Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Appl Energy* 2016;161:718–32. doi:10.1016/j.apenergy.2015.07.067.
- [28] Ridjan I, Mathiesen BV, Connolly D, Hansen K, Wunsch JH. Applications of SOECs in different types of energy systems - German and Danish case studies. Copenhagen, Danmark: Department of Development and Planning; 2015.
- [29] Commission E. Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and ame. Brussels: Official Journal of the European Union; 2009.
- [30] Methanol Institute. Methanol Gasoline Blends - Alternative Fuel For Today's Automobiles and Cleaner Burning Octane For Today's Oil Refinery. 2016.
- [31] European Commission. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) - COM(2016) 767 final. Brussels, Belgium: European Commission; 2016.
- [32] Corporation VT. VOLVO BIO-DME. Unique field test in commercial operations, 2010–2012. 2012.
- [33] CRI - Carbon Recycling International. Carbon Recycling International launches fleet test of Geely Emgrand 7 methanol powered vehicles n.d. <http://carbonrecycling.is/news/2016/4/13/carbon->

recycling-international-launches-fleet-test-of-geely-emgrand-7-methanol-powered-vehicles (accessed February 6, 2017).

- [34] Poland at Sea. Stena Line methanol project shortlisted for Global Freight Awards n.d. <http://www.polandatsea.com/stena-line-methanol-project-shortlisted-for-global-freight-awards/> (accessed February 6, 2017).
- [35] Hellsmark H, Jacobsson S. Realising the potential of gasified biomass in the European Union - Policy challenges in moving from demonstration plants to a larger scale diffusion. *Energy Policy* 2012;41:507.
- [36] The Poul la Cour Museum. Storing wind power n.d. <http://www.poullacour.dk/engelsk/vindkraften.htm> (accessed December 9, 2016).
- [37] Zeng K, Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog Energy Combust Sci* 2010;36:307–26. doi:10.1016/j.pecs.2009.11.002.
- [38] Hydrogen NEL. Product leaflet – NEL P60 Pressurized electrolyser n.d.;2013.
- [39] Smolinka T, Gunther M, Garcke J. now-studie: stand und entwicklungspotenzial der wasserelektrolyse zur herstellung von wasserstoff aus regenerativen energien. technical report - Google-søgning 2011;2013.
- [40] Paidar M, Fateev V, Bouzek K. Membrane electrolysis—History, current status and perspective. *Electrochim Acta* 2016;209:737–56. doi:10.1016/j.electacta.2016.05.209.
- [41] Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38:4901–34. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [42] Ursua A, Gandia LM, Sanchis P. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proc IEEE* 2012;100:410–26. doi:10.1109/JPROC.2011.2156750.
- [43] Smart Grids and Energy Storage: World’s Largest Hydrogen Electrolysis Facility n.d. <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-largest-hydrogen-electrolysis-facility.html> (accessed January 3, 2017).
- [44] Siemens, Blue Fuel Energy. Siemens and Blue Fuel Energy to install 20 MW of Silyzer-200 PEM technology 2014.
- [45] HyBalance project 2016. <http://hybalance.eu/> (accessed July 20, 2016).
- [46] Jensen JK, Grahl-Madsen L, Jørgensen J, Yde L, Hendriksen PV, Jensen TL. Strategi for elektrolyse. 2016.
- [47] Marini S, Salvi P, Nelli P, Pesenti R, Villa M, Berrettoni M, et al. Advanced alkaline water electrolysis. *Electrochem Front Glob Environ ENERGY* 2012;82:384–91. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.011.
- [48] Brisse A, Schefold J, Zahid M. High temperature water electrolysis in solid oxide cells. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33:5375–82. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.120.
- [49] SOPHIA | solar integrated electrolysis n.d. <http://www.sophia-project.eu/> (accessed December 10, 2017).
- [50] Eco - Efficient Co-Electrolyser for Efficient Renewable Energy Storage n.d. <http://www.eco-soec-project.eu/> (accessed December 10, 2017).
- [51] Seier J. Demonstration Projects on Energy Storage Technologies in Germany 2016.

- [52] de Bucy J, Lacroix O, Jammes L. The potential of Power-to-Gas - Technology review and economic potential assessment. Paris: 2016.
- [53] Electrochaea's First Methane Production n.d. <http://www.electrochaea.com/latest-news/electrochaeas-first-methane-production/> (accessed December 10, 2017).
- [54] Bailera M, Lisbona P, Romeo LM, Espatolero S. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:292–312. doi:10.1016/j.rser.2016.11.130.
- [55] CRI - Carbon Recycling International. CRI's power-to-methanol technology at steel manufacturing plant in Sweden n.d. <http://carbonrecycling.is/news/2016/11/17/cris-power-to-methanol-technology-at-steel-manufacturing-plant-in-sweden> (accessed January 3, 2017).
- [56] Climeworks. About the pilot and demonstration project n.d. <http://www.climeworks.com/about-project.html> (accessed January 3, 2017).
- [57] ScienceAlert. Scientists are building a system that could turn atmospheric CO₂ into fuel n.d. <http://www.sciencealert.com/scientists-are-building-a-system-that-could-turn-atmospheric-co2-into-fuel> (accessed January 4, 2017).
- [58] Mack E. Reactor that produces liquid fuel from CO₂ in the air to be tested in portable pilot plant 2016. <http://newatlas.com/carbon-dioxide-fuel-pilot-plant-finland-kit-ineratec/46362/> (accessed December 13, 2016).
- [59] Hydrogen Europe. The ultimate guide to fuel cells and hydrogen technology. Brussels: 2015.
- [60] ITM Power. €35m H₂ME₂ European Hydrogen Refuelling Station deployment 2016. <http://www.itm-power.com/news-item/e35m-h2me2-european-hydrogen-refuelling-station-deployment> (accessed January 4, 2017).
- [61] European Parliament. Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. Brussels, Belgium: 2014.
- [62] O'Sullivan F. Germany Has the World's First Hydrogen-Powered Train 2016. <http://www.citylab.com/commute/2016/09/germany-hydrogen-passenger-train/501575/> (accessed January 4, 2017).
- [63] Brintbiler.dk n.d. <http://brintbiler.dk/> (accessed December 6, 2017).
- [64] Ridjan I, Hansen K, Sorknæs P, Xu J, Connolly D, Mathiesen BV. The role of electrolyzers in energy systems - Energy markets, grid stabilisation and transport fuels. Department of Development and Planning; 2016.
- [65] Lov om ændring af lov om elforsyning, lov om fremme af vedvarende energi og elsikkerhedsloven og om ophævelse af lov om tilskud til fremme af vedvarende energi i virksomheders produktionsprocesser (Udfasning af PSO-opkrævning, ophævelse af ForskEL, finans. Energi-, Forsynings- og Klimaministeriet; 2016.
- [66] European Commission. DIRECTIVE (EU) 2015/1513 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 9 September 2015 amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewabl. Bruxelles, Belgium: Official Journal of the European Union; 2015.
- [67] Wenzel H, Højbye L, Hamelin L, Rune Duban G, Neil Bird D, Strange Olesen A, et al. Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system. Denmark: COWI; 2014.

- [68] Energisystemet. Analyse af alternative muligheder til opfyldelse af 2020 målet for VE til transport. 2015.
- [69] Dansk Elbil Alliance. Bestand af elbiler i Danmark n.d. http://www.danskelbilalliance.dk/Statistik/Bestand_modeller.aspx (accessed October 18, 2016).
- [70] Duus SD. Biobrændstof stemt igennem på Christiansborg n.d. http://energiwatch.dk.zorac.aub.aau.dk/secure/Energinyt/Olie___Gas/article9229667.ece (accessed December 18, 2016).
- [71] Danish Energy Agency. Danmarks energi- og klimafremskrivning 2014 (Denmark's energy and climate projection 2014). Danish Energy Agency; 2014.
- [72] Connolly D. eRoads: A comparison between oil, battery electric vehicles, and electric roads for Danish road transport in terms of energy, emissions, and costs. 2016.
- [73] Rotmans J, Kemp R, Asselt, M V. More evolution than revolution: transition management in public policy. *J Futur Stud Strateg Think Policy* 2001;3.
- [74] Danish Energy Agency, Energinet.dk. Technology data for energy plants. Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion. vol. 2013. Danish Energy Agency and Energinet.dk; 2012. doi:ISBN: 978-87-7844-931-3.
- [75] Ridjan I. Integrated electrofuels and renewable energy systems. Department of Development and Planning, 2015.