

STATUS STYRKER SYNERGIER

DaCES RAPPORT OM ENERGILAGRING I DANMARK 2023



STATUS, STYRKER, SYNERGIER

DaCES RAPPORT OM ENERGILAGRING I DANMARK 2023

Med DaCES rapport om energilagring i Danmark 2023 fremlægger vi en række anbefalinger målrettet beslutningstagere, myndigheder og bevillingsgivere, sekundært rettet mod investorer, teknologi- og erhvervsledere. Visionen er at gøre energilagring- og konvertering til en dansk styrkeposition.

Anbefalingerne og rapportens indhold er udarbejdet i tæt dialog med medlemmer i DaCES’ faglige arbejdsgrupper og medlemmer af styregruppen for DaCES. Der er afholdt arbejdsgruppemøder og en tværgående workshop, hvor indhold er drøftet og udvalgt. Eksterne eksperter har besvaret og godkendt besvarelser af spørgsmål, som DaCES har udsendt. I rapporten indgår en række cases - udvalgte danske nøgleprojekter, der demonstrerer innovation, forskning og udvikling inden for energilagring.

DaCES har koordineret, udfordret og samlet bidrag ved teknisk chefkonsulent Niels Dyreborg Nielsen samt chefkonsulent Dorthe Brander Pedersen, kommunikationskonsulent Julie Søgaard og direktør Anne Marie Damgaard.

DANSK CENTER FOR ENERGILAGRING (DaCES)

Danmark skal være førende inden for forskning, udvikling, anvendelse og integration af energilagringsteknologier, som er konkurrencedygtige på et globalt marked og bidrager til at reducere verdens klimaaftryk.

DaCES er et neutralt og uafhængigt forum, der arbejder for at sætte retning for forskning, uddannelse og innovation inden for energilagring og -konvertering. Vi er en medlemsdrevet, netværksbaseret og handlingsorienteret organisation, der samler aktører i et ligeværdigt, fagligt orienteret interessefælleskab. Vi arbejder på tværs af energilagringsteknologier og faglige discipliner som natur og ingeniørvidenskab, matematik, samfundsvidenskab, økonomi og humaniora mv. Formålet er at skabe samarbejder, netværk og partnerskaber, der samler forskningsmiljøer og virksomheder i at bidrage til at løse store samfundsudfordringer og frigøre os fra de fossile brændstoffer. Vi arbejder for, at strategisk og tværgående forskning og uddannelse bidrager til, at energilagring bliver en dansk styrkeposition til gavn for klima, erhvervsliv og samfund.

DaCES er støttet af Industriens Fond.

DaCES er i 2023 etableret som selvstændig forening – knyttet til ATV. DaCES er baseret på en medlemskreds af mere end 50 virksomheder og organisationer.

For medlemskab: www.daces.dk

DaCES arbejdsgrupper

DaCES leder og faciliterer fire tekniske arbejdsgrupper inden for termisk lagring, batterier, PtX og systemintegration samt en arbejdsgruppe, der arbejder med uddannelse. Arbejdsgruppernes medlemmer kan findes sidst i rapporten.

Disclaimer

DaCES har eneansvaret for rapporten, som ikke nødvendigvis afspejler de enkelte medlemsorganisationers egne holdninger, men derimod kompromiser opnået i de fem respektive arbejdsgrupper. Medlemmer af DaCES er ikke ansvarlig for nogen form for brug af informationen i denne rapport.

Vil du vide mere:

Anne Marie Damgaard

Direktør

DaCES – Dansk Center for Energilagring

amd@daces.dk

FORORD

Klimaudfordringerne i verden er de seneste år blevet stadig mere akutte og synlige. Denne sommers globale varmerekorder, skovbrande, voldsom nedbør og oversvømmelser er et forvarsel om en fremtid, hvor ekstremt vejr vil forekomme med større hyppighed. Der er bred enighed om, at vi er nødt til at handle på krisen. Klima er også energi-, erhvervs-, udenrigs- og sikkerhedspolitik.

Danmark har vedtaget en klimalov med en ambitiøs målsætning om at reducere drivhusgasudledninger med 70 procent inden 2030 og nå klimaneutralitet i 2045 - med et pitstop allerede i 2025. Den danske regering har vedtaget en lang række politiske aftaler, der skal gøre klimamålsætningerne til virkelighed, fremme den grønne omstilling og gøre Danmark fri af russisk gas.

Fremtidens klimaneutrale energisystemer vil primært være baseret på vedvarende energiproduktion. Det er godt for klimaet, men skaber imidlertid en øget sårbarhed med ubalancer mellem elforbrug og -produktion. Det kan føre til uhensigtsmæssig energiknaphed, eller energioverskud, i perioder og dermed sårbarhed og stærkt svingende priser på energimarkedet.

Energilagring er derfor en nøgle til et robust energisystem og er dermed en helt afgørende brik i at indfri et CO₂-neutralt, integreret og omkostningseffektivt energisystem. Vores nabolande har allerede udviklet omfattende strategier og planer for energilagring. Og Europa-Kommissionen anser energilagring som en af otte nøgleteknologier til at sikre Europas grønne omstilling. Kapløbet er i gang, og Danmark risikerer at miste positionen som grøn pionér og tabe markedsandele til udlandet, hvis vi ikke hurtigt investerer tid og flere ressourcer i området.

Danmark har fundamentet til at blive førende inden for energilagring, energikonvertering og integrering af vedvarende energi på tværs af sektorer og systemer. Vores specialiserede viden gør, at vi kan accelerere den grønne omstilling både nationalt og internationalt. Forudsætningen er hurtig, understøttende og vedholdende handling fra flere niveauer, faggrupper og sektorer.

Dansk Center for Energilagring (DaCES) er med til at løse udfordringerne og bringe Danmark frem i feltet inden for energilagring. Dette gør vi ved at igangsætte samarbejder og sikre videndeling mellem dansk erhvervsliv og vidensinstitutioner. Koordineringen accelererer aktørernes arbejde med at forske, udvikle, demonstrere og driftsoptimere energilagrings- og konverteringsteknologier, der kan blive til grønne, innovative og konkurrencedygtige løsninger. Og ved at arbejde for at teknologierne tager hånd om borgernes behov og accept.

Vores bud på, hvordan Danmark kan indfri potentialerne i energilagring, er beskrevet i denne rapport. Rapporten er udarbejdet i et tæt samarbejde med DaCES’ medlemmer og arbejdsgrupper – mange af Danmarks fremmeste eksperter på området.

Det er DaCES’ første rapport om ”Status, styrker, synergier for energilagring i Danmark”. Rapporten præsenterer en kortlægning af potentialet for en række energilagringsteknologier: Termisk energilagring, batterier, Power-to-X og systemintegration i et energisystem baseret på vedvarende energi. Vi præsenterer konkrete forslag, som kan medvirke til realisering af en grøn og bæredygtig omstilling.

Rapporten fremlægger først en række anbefalinger for hver af de faglige områder. Herefter beskrives mere detaljeret hvilke muligheder og udfordringer, der findes på de enkelte områder. Beskrivelserne for henholdsvis termisk energilagring, batterier og PtX kan læses enkeltvis og refererer ikke til hinanden, mens beskrivelsen af systemintegration søger at give en samlet forståelse af energilagring. Yderligere følger et afsnit om uddannelse og behovet for arbejdskraft til området.

I alt fremlægger vi 17 anbefalinger, der kan styrke Danmarks rolle som grønt foregangsland på energilagringsområdet. Det er afgørende, at DaCES’ anbefalinger bliver formidlet, diskuteret og videreudviklet i de rette fora. Derfor vil DaCES med udgangspunkt i anbefalingerne tage initiativ til dialog og samarbejde med beslutningstagere, myndigheder, bevillingsgivere og øvrige erhvervsliv om at realisere potentialet for det danske økosystem af aktører, der arbejder med energilagring.

Omstilling af vores energisystemer er så omfattende og indgribende, at det kun lader sig realisere interdisciplinært og på tværs af sektorer. Samtidig er tiden knap og der er behov for en hurtigere udvikling, end vi er vant til fra andre observerede teknologiomstillinger og udviklinger. Siden 2021 har DaCES været dybt involveret i at udvikle og drive innovationsmissionen og partnerskabet MissionGreenfuels, der skal udvikle grønne brændstoffer til transport og industri frem mod 2030 og 2045/50. Det er en overvældende opgave, hvor netop samarbejde og vidensdeling på tværs af indsigter, teknologier og aktører er helt afgørende.

Vi kender ikke den præcise opskrift på at lykkes med at få omstillingen til at ske, men det er hævet over enhver tvivl, at vi som samfund er på en mission, og at institutioner som DaCES er nødvendige i forhold til at sætte de rigtige hold og skabe de rigtige rammer for opfyldelse af missionen om en dyb, omfattende OG hurtig omstilling af vores energisystem uafhængig af særinteresser.

Rigtig god læselyst!



Anne Marie Damgaard,
direktør, DaCES



Lars Ditlev Mørck Ottosen,
professor, institutleder Aarhus
Universitet, bestyrelsesleder
DaCES

INDHOLD

Forord	3
Dansk Center for Energilagring har 17 anbefalinger	6
Termisk energilagring	7
Batterier	7
Power-to-X	8
Systemintegration	8
Uddannelse	9
Termisk energilagring er essentiel for at realisere et grønt energisystem	11
Hvad er termisk energilagring?	12
Anvendelser af termisk lagring i Danmark	13
Energilagring kan nedbringe CO ₂ -udledning fra varmeproduktion	13
Danske styrkepositioner	14
Case 1 – DTU optimerer faseskiftende materials høje energitæthed til kompakt og decentral energilagring	15
Case 2 – Fleksibelt og innovativt damvarmelager giver billigere og grønnere varme til fjernvarmekunder	16
Case 3 – Heliac leverer kosteffektiv, CO ₂ -fri og fleksibel lagring af vedvarende og overskydende varme i stenlager	17
Case 4 – Hyme lagrer VE-el i smeltet salt til elforsyning og industriel procesvarme	18
Batterier – en vigtig brik i den grønne omstilling	20
Den danske batteriværdikæde	22
Styrkepositioner i den danske batterisektor	24
Case 1 – Topsoe udvikler koboltfrie katoder med høj litiumudnyttelse	25
Case 2 – VisBlue producerer bæredygtige batteriløsninger til lagring af grøn strøm	26
Case 3 – XOLTA gør det muligt for virksomheder og private at optimere VE-anlæg med intelligent styring	27
Power-to-X i Danmark	29
Fra fornybar elektricitet til samfundsvigtige molekyler	30
Udvikling af det danske PtX-økosystem	31
Centrale, udvalgte PtX-udfordringer	32
Modning af elektrolyseteknologier	32
Markedsmekanismer kan skabe konkurrencedygtige demonstrationsanlæg	33
Involvering af lokalsamfundet ved opførelse af nye anlæg	33
Case 1 – Pionercentret CAPEX accelererer udvikling og opdagelse af bæredygtige og skalerbare PtX-materialer	34
Case 2 – Topsoes udvikling af elektrolyseceller til højeffektiv SOEC-elektrolyse	35
Case 3 – Brint fra selvforsynende energi på land gør vejtransport og skibsfart grønnere	36
Case 4 – Dynamisk produktion af ammoniak reducerer belastning af elnet og klimaaftryk fra skibsfart og landbrug	37
Case 5 – Verdens største e-metanolanlæg gør legetøj, medicin og brændstof grønnere	38
Systemintegration kan gøre energisystemet stabilt, rentabelt og grønt	41
Hvad betyder systemintegration?	42
Realisering af synergipotentialer ved systemintegration	43
Systemforståelse viser vejen mod et klimaneutralt energisystem	43
Behov for energilagring i et klimaneutralt energisystem	44
Faglig og akademisk uddannelse er en prioritet for den grønne omstilling	47
Uddannelse	47
DaCES arbejdsgrupper	50
DaCES styregruppe	51
DaCES bestyrelse	51
Referenceliste	52

Dansk Center for Energilagring har 17 anbefalinger

DaCES fremmer udvikling af teknologier til energilagring og -konvertering ved at samle de vigtigste aktører fra forskning, erhvervsliv, GTS og myndigheder. Målet er at gøre energilagring til en dansk styrkeposition i internationalt perspektiv. DaCES arbejder med fem fokusområder: Termisk energilagring, batterier, PtX, systemintegration og uddannelse.

Skal vi lykkes med en bæredygtig og omkostningseffektiv omstilling af vores energisystem, kræver det fokus på teknologiudvikling og på at udnytte synergimuligheder mellem de forskellige teknologier og deres anvendelse. Dette kræver tæt samarbejde mellem forskning, innovation og politik – universiteter, virksomheder, GTS, rådgivere, investorer, myndigheder og lovgivere. Lige så afgørende er det at sikre den nødvendige arbejdskraft, herunder en højtuddannet arbejdsstyrke. Allerede i dag bidrager dygtige medarbejdere til driftsoptimering af anlæg med digitale og sektorintegreerede løsninger, materialeudvikling og optimal ressourceudnyttelse. Men behovet vokser i takt med omstillingen. Det er derfor afgørende at opskalere STEM-arbejdsudbuddet gennem politisk prioritering af teknisk uddannelse, forskning og efteruddannelse.

Vores anbefalinger er inddelt i fem områder:

- 1. Termisk energilagring
- 2. Batterier
- 3. Power-to-X
- 4. Systemintegration
- 5. Uddannelse

Vores anbefalinger kortlægger, hvordan de forskellige teknologier og områder inden for energilagring og -konvertering bidrager til at reducere klimabelastning i industrien og leverer løsninger til den grønne omstilling. Energilagring og -konvertering er vigtige brikker i den grønne omstilling. Det er ikke ”en one size fits all”, behovet er alsidigt, hvorfor løsningerne heller ikke skal være de samme.

Vi konstaterer, at der overordnet mangler investering i forskning og teknologiudvikling inden for energilagring – både til de enkelte teknologier og til de løsninger, der optimerer energisystemer på tværs. Desuden er der brug for bedre rammevilkår og oplysning om, hvad energilagring og -konvertering rent faktisk er, og hvordan teknologierne indgår i det samlede energisystem.

ANBEFALINGER fra DaCES

1. Termisk energilagring

- 1.1 Omstilling af industriens varmekonsum: Varmelagring har et stort, overset potentiale**
Industriens varmebehov over 100°C er markant og klimabelastende. Industrielle processer har et driftsmønster, som vanskeligt lader sig justere efter svingende VE-elproduktion og elpris. Industrien har naturligt fokus på at producere konkurrencedygtige og gode produkter. En dekarbonisering af industriel procesvarme vil blive fremmet gennem udvikling og optimering af varmelagre i samspil med varmeproduktion. Vi foreslår desuden at give investorer bedre værktøjer til at vurdere økonomien i varmelagringsprojekter ved at udvikle standardiserede teknoøkonomiske beregningsmetoder.
- 1.2 Optimering af fleksible varme- og kuldagre under 100 °C**
Varmelagre kan være mere omkostningseffektive end elektriske lagre og kan indgå i synergi med varmepumper, solvarme, elvarme, industriel overskudsvarme og PtX-anlæg afhængig af temperatur. Termiske lagre under 100°C har stort potentiale til at indfri CO₂-reduktioner i områder uden fjernvarme samt områder med kølebehov. Disse anvendes allerede i stort omfang, men kan videreudvikles. Indfrielse af potentialet kræver udvikling og optimering af lagringsteknologier, som fleksibelt, intelligent og omkostningseffektivt integrerer varierende VE-forsyning (solvarme, varmepumper etc.).
- 1.3 Fjern prisloftet for overskudsvarme samt fritag affaldsforbrændingsanlæg for varmeafgift for lagring**
Industri, affaldsforbrændingsanlæg, datacentre m.fl. skal i højere grad have incitament til at nyttiggøre deres overskudsvarme. Det uudnyttede overskudsvarmepotentiale er i dag omkring 7,8 TWh/år svarende til 10% af Danmarks varmekonsum og kan i 2045 udgøre 19 TWh [1] [2]. Datacentre og elektrolyseanlæg til produktion af PtX kan markant forøge potentialet af overskudsvarme [3]. Det er unødvendigt med et prisloft, da projektbekendtgørelsen forudsætter, at overskudsvarmeprojekter er en økonomisk fordel for forbruger, virksomheder, industri og samfund. I projektbekendtgørelsen beskrives det, hvordan kommunalbestyrelsens planlægning for varmeforsyning, godkendelse af projekter for kollektive varmeforsyningsanlæg og behandling af sager udføres i overensstemmelse med lov om varmeforsyning i øvrigt.

2. Batterier

- 2.1 Udarbejd en langsigtet, national batteristrategi med målbare initiativer og prioritering af styrker**
Strategien skal stimulere forskning, vækst og investeringer i den danske batterisektor. Den skal styrke Danmarks konkurrenceevne i et marked, hvor vores nabolande har udviklet omfattende strategier og planer. Batteristrategien skal an vise, hvordan Danmark ved at styrke vores kernekompetencer kan øge indsatsen i det europæiske batterisamarbejde.
- 2.2 Energilagring, herunder batterier, skal prioriteres som selvstændigt strategisk tema i bevillinger fra danske offentlige og private aktører**
Med en national batteristrategi kan vi understøtte og videreudvikle allerede etablerede danske styrkepositioner som næste generations ion-batterier, nye genanvendelige batterityper og digitale optimeringsværktøjer. Dertil kommer anvendelse i forbindelse med intelligent styring, integrering og automatisering af batterisystemer. Det er især målrettet biler, lastbiler, busser, færges og ladeinfrastruktur samt lokal energibalancering, der reducerer flaskehalse i elnettet og leverer systemydelser.
- 2.3 Skab understøttende vilkår for anvendelse af egenproduceret VE-elektricitet i energifællesskaber**
Energifællesskaber kan bestå af borgere, kommuner, foreninger, institutioner og erhvervsliv. Energifællesskaber kan reducere lokal, omkostningsfuld elnetudbygning og anspore til lokale grønne tiltag med CO₂-reduktioner til følge. Værktøjerne er lokal produktion samt fleksibel deling, forbrug og lagring af egenproduceret energi herunder især elektricitet. Økonomien i energifællesskaber er udfordret pga. elafgifter og -tariffer ved både op- og afladning fra et fælles batteri. Vi foreslår at ændre uhensigtsmæssig regulering og krav for at opnå både lokale og samfundsmæssige gevinster. Dette skal gennemføres uden at ændringerne rammer forbrugere, der ikke har økonomisk råderum til at investere i VE-anlæg.

3. Power-to-X

- 3.1 Investeer i innovationsmissioner og langsigtede partnerskaber for at nå klimamål i 2030 og 2045/50**
Danmark skal reducere drivhusgasudledninger med 70 procent inden 2030, nå klimaneutralitet i 2045 og hermed bidrage til globale klimaløsninger. Etableringen af langsigtede partnerskaber i en missionsbaseret tilgang til forskning og innovation, hvor aktører, ressourcer og kompetencer samles om at nå ét mål er vigtig. Danske vidensinstitutioner, virksomheder og rådgivere har stærke kompetencer indenfor PtX-teknologi og grønne brændstoffer på tværs af hele værdikæden. Partnerskabet MissionGreenFuels fokuserer på udvikling af grønne brændstoffer til transport og industri frem mod 2030 og 2045/50. Danmark kan blive førende i udvikling af PtX-løsninger og grønne brændstoffer, men det kræver finansiering til innovationsmissionerne med en længere tidshorisont, der understøtter de langsigtede mål frem mod 2045/50.
- 3.2 Skab klare rammevilkår, der gør Danmark til pionér inden for PtX-teknologi**
Danske universiteter, vidensinstitutioner, erhvervsliv og rådgivere er stærkt repræsenteret i hele PtX-værdikæden. Her arbejdes med anvendelsesnær teknologimodning af kendte men umodne teknologier og med grundforskning i nye teknologier med et 30 års perspektiv. Baseret på denne styrkeposition kan Danmark accelerere forskning, udvikling og demonstration af innovative og industrielle PtX-løsninger, der rummer et globalt eksportpotentiale. For at realisere dette potentiale er det afgørende, at der fra offentlig side fremlægges 1) regulering med et langsigtet perspektiv, som indtænker de nye teknologier og virkemidler, og 2) langsigtede rammevilkår, der intensiverer risikobetonede, kapitalintensive investeringer i anlæg, der kan understøtte efterspørgsel og markedsudvikling for PtX-teknologi og grønne brændstoffer.
- 3.3 Prioriter PtX til energiintensive industrier og langdistance luft- og skibsfart for maksimal klimagevinst**
Udvikling af PtX kræver store ressourcer af vand, elektricitet, materialer og arbejdskraft. Udviklingen af PtX-produkter indebærer energiintensive processer med flere komplekse procestrin og tilhørende stort energitab. Derfor skal PtX allokeres til udvalgte formål herunder kunstgødning, metanol, råstof i kemiske processer, brintintensive processer, stål, skibsfart og transkontinental luftfart. Det giver mest klimaeffekt for de anvendte penge, ressourcer, råstoffer og arbejdstimer.

4. Systemintegration

- 4.1 Udvikling af systemintegrationsløsninger er afgørende for fremtidens effektive energisystem**
Fremtidens energisystem bliver komplekst med storskala elektrificering og mere vedvarende energi. Systemløsninger er nøglen til at integrere vedvarende energi på en økonomisk og samfundsgavnlig måde. Der er store muligheder for at høste synergier i form af fleksibilitet, skift mellem energikilder og nyttiggørelse af ellers bortledt energi. Men det kræver strategisk energiplanlægning og en bedre systemforståelse, modellering og styring af energisystemers komponenter. For at lykkes med at udvikle energieffektive systemløsninger skal forskning og industri arbejde tæt sammen. Centrale redskaber er industriel demonstration baseret på forskning og udvikling i AI og datadrevne digitale tvillinger, algoritmer og software.
- 4.2 Etablér strategisk energiplanlægning og koordinering mellem aktører på alle niveauer**
En stærk, markedsdrevet implementering kræver en koordineret, strategisk energiplanlægning på tværs af kommuner samt mellem kommuner og stat. Koordineringen muliggør en accelereret og intelligent implementering af vindmøller, solceller, biogasanlæg, PtX-teknologier, fjernvarme, energieffektivitet, geotermi og energilagring. Opførelse af transmissionsledninger er omfattende og kostbare. Ved koordinering og samplacering af nye, store vedvarende energianlæg tæt på store elforbrugere kan opførelse af elledninger til transmissionsnet reduceres markant og udgifterne til grøn omstilling begrænses betragteligt. Det er afgørende, at der planlægges på tværs af de involverede energiaktører på kommunalt, regionalt og nationalt niveau for at øge udnyttelsen af eksisterende og ny energiinfrastruktur.
- 4.3 Skab enkle og gennemsigtige rammebetingelser, der fremmer effektiv integration af vedvarende energi, lokalt, nationalt og internationalt**
Varierende elpriser og elnettariffer samt mulighed for at etablere direkte elledninger tilskynder til at energilagring kan spille en større samfundsgavnlig rolle ved udvikling af mere dynamiske tariffer og nye, digitale og

automatiske løsninger. Etablering af PtX-produktion og store elektrolyseanlæg er energikrævende, hvorfor vedvarende energikilder skal forsyne dem med energi. Lovgivere skal sikre rammebetingelser for, at der kan etableres en fleksibel drift af elektrolyseanlæg, en hensigtsmæssig placering af de pågældende anlæg og et fundament for en afsætning af PtX-produkter.

Løbende tilpasning af lovgivning og regulering er afgørende for at sikre konstruktiv støtte til - og aktiv involvering i - den grønne omstilling fra kommuner, forsyningsvirksomheder, erhvervsliv, borgere og lokalsamfund. Tilpasningen af rammebetingelser bør også ske internationalt, hvilket indebærer koordinerede, europæiske energisamarbejder. Integration og udveksling af især elektricitet og gas kan reducere vejen til klimaneutralitet ved at styrke fælles økonomi, sikkerhed og vedvarende energiforsyning.

4.4 Afsæt ressourcer til opdatering af Energistyrelsens teknologikatalog for energilagring i dialog med forskere, erhvervsliv og rådgivere

Udviklingen af energilagringsteknologier går meget stærkt, hvorfor Energistyrelsens teknologikatalog risikerer at indeholde forældede estimater. Der skal sikres en proces for løbende opdatering i tæt dialog med relevante aktører. Kataloget er fagligt kvalitetssikret og centralt for energiplanlægning i Danmark og i udlandet. Det finder anvendelse i rentabilitetsanalyser af energilagringsprojekter, som investorer, industri og rådgivere baserer deres arbejde på. Løbende opdatering er afgørende for, at katalogets data er retvisende og anvendelige for hele aktørkredsen, der arbejder med energisystemer og den grønne omstilling

5. Uddannelse

5.1 Opskalér arbejdsudbuddet af STEM kandidater

Energilagringsteknologier spiller en central rolle i fremtiden energisystem og har et globalt vækstpotentiale, som kræver STEM-eksperter. Danmark har en højtuddannet arbejdsstyrke, der allerede i dag bidrager til driftsoptimering af anlæg med digitale og sektorintegrerede løsninger, materialeudvikling og optimal ressourceudnyttelse. Det er afgørende at opskalere STEM-arbejdsudbuddet gennem politisk prioritering af teknisk uddannelse, forskning og efteruddannelse herunder fokus på unges og særligt kvindernes uddannelsesvalg.

5.2 Styrk efter- og videreuddannelse – grønt mindset, digitalisering, økonomi og jura

Efter- og videreuddannelse af voksne skal sikre, at virksomhederne har de nødvendige kompetencer til den grønne omstilling. Systemet for erhvervsrettet voksen- og efteruddannelse (VEU) bør gøres mere fleksibelt og overskueligt, og kvaliteten i undervisningen bør styrkes. Digitalisering er en væsentlig del af den grønne omstilling. Der bør gøres en indsats for at styrke de digitale kompetencer hos den danske arbejdsstyrke, hvor 25% mangler basale færdigheder [4]. Kompetencer relateret til de økonomiske og juridiske rammebetingelser for den grønne omstilling er ligeledes afgørende og bør styrkes.

5.3 Øg rekruttering og fastholdelse af udenlandsk arbejdskraft

Den grønne omstilling øger behovet for rekruttering af udenlandsk arbejdskraft. Udenlandske studerende, der bliver i Danmark efter endt studie, er en stor gevinst for det danske arbejdsmarked og økonomi [5]. Danmark har derimod ikke let ved at tiltrække udenlandsk faglært arbejdskraft [6]. Der bør gøres en målrettet indsats for at øge rekruttering og fastholdelse af udenlandsk arbejdskraft - både faglært og akademisk uddannet.

5.4 Priorité arbejdskraft til den grønne omstilling

Der er brug for en politisk prioritering af arbejdskraft til den grønne omstilling. Det danske økosystem for energilagring støtter CONCITO og Mandag Morgens anbefaling om, at der bør være et tættere samarbejde mellem Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet og Beskæftigelsesministeriet, så klima- og miljølovgivning og -politik kan blive konsekvensvurderet i forhold til behovet for arbejdskraft [7].



TERMISK ENERGILAGRING ER ESSENTIEL FOR AT REALISERE ET GRØNT ENERGISYSTEM

Både i Danmark og udlandet er der en stigende interesse for termisk lagring. Drivkræfterne i Danmark inkluderer stigende CO₂-kvotepriser, CO₂-afgift samt ønsker om gasafhængighed, øget elektrificering og reduceret klimaaftryk [8] [9]. Mere ukontrollabel sol- og vindenergi i energisystemet medfører mere mismatch mellem energiforbrug og -produktion. Allerede i 2021 svarede mængden af uudnyttet vindmøllestrøm til 7% (1,2 TWh) af dansk vindmølleproduktion eller omkring 750.000 danskeres årlige elforbrug [10] [11]. Dertil lukker flere termiske kraftvarmeværker, som i dag mod betaling holder elnettet stabilt ved at regulere værkernes elproduktion [12]. Forsyningssikkerheden bliver derfor udfordret pga. højere andel af vedvarende energi i elnettet kombineret med lukning af kraftvarmeværker.

Vindmøller leverer i Danmark den største mængde vedvarende elektricitet, som storskalabatterier teknisk kan lagre. Nuværende kommercielle batterier er generelt urentable som storskala energilager i korte perioder (timebasis). Derimod er løsninger, der lagrer el som varme og kulde (termisk energi) over lange perioder (time-, dags- og månedsbasis) mere omkostningseffektive [13] [14] [15] [16].

Termisk energilagring kan hjælpe med at håndtere udfordringer forbundet med et klimaneutralt energisystem, da det tilbyder kosteffektiv, ressourceoptimerende og balancerende energilagring, der understøtter integration på tværs af energisystemer og -teknologier. Industrielle varmepumper og køleanlæg er typisk mere kosteffektive i kombination med energilagring pga. større udnyttelse af elprisvariationer. Specifikt kan varmelagring nyttiggøre forventede stigende mængder overskudsvarme fra elektrolyseanlæg og datainfrastruktur i fleksibelt samspil med resten af energisystemet [17] [18].

Dette kapitel gennemgår begrebet termisk energilagring og tilhørende principper, som danner basis for at forklare samfundsværdien af termisk energi og dets uundværlige rolle i den grønne omstilling.

Tabel 1: Oversigt over udvalgte lagringsmedier tilknyttet principper og tilhørende anvendelser.

Temperatur [°C]	Udvalgte lagringsmedier og princip [22]	Anvendelse [23]
Rumvarme og køling	Sensibel: Vand (tanke, damvarmelager, aquifer), jord (borehuller), keramik Latent: Vand, paraffin, fedtholdig syre, polyethylen, glykol, salthydrater	Rumvarme og brugsvand individuelt og kollektivt (fjernvarme) Køling individuelt og kollektivt (fjernkøling)
<100°C	Sensibel: Vand (tanke, damvarmelager, aquifer), jord (borehuller), keramik Latent: Paraffin, salthydrater Sorption: Vand i silika, zeolit og NaOH	Lavtemperatur procesvarme (direkte og indirekte) anvendt i fx mejerier, fiskeri- og drikkevare- papirindustri
100-150°C	Sensibel: Sten, smeltet salt, keramik, sand, beton, damp, olie Latent: Sukkeralkohol, paraffin Sorption: Vand i silika og zeolit	Procesvarme i bagerier, tekstil- og medicinalindustri
>150°C	Sensibel: Sten, smeltet salt, keramik, sand, beton, damp, olie Latent: Sukker, alkohol, nitrat, hydroxid Sorption: Vand i zeolit (max 200°C) Termokemisk: Reversible termokemiske processer	Procesvarme i træ-, tegl- og plast-, cement-, glas- og jernindustri samt raffinaderier Elproduktion på f.eks. kraftvarmeværker via dampturbiner



Damvarmelager på 70.000 m³ i Høje Taastrup under etableringsfasen.

Hvad er termisk energilagring?

Termisk energi kan lagres enten ved at opvarme eller nedkøle lagringsmedier som vand, sten, salte, olier og metaller m.m. Medierne kan med begrænset tab lagre den tilførte varme eller kulde med henblik på anvendelse senere. Valg af lagringsmedie og -princip afhænger af parametre som lagringstemperatur, hastighed og effekt ved op- og afladning, lagringstid, energimængde lagret etc.

Varmeenergi har bred anvendelse, hvilket i Danmark primært inkluderer fjern- og procesvarme til husholdninger, bygninger, erhverv og industrier. Køling finder anvendelse inden for særlig detailhandel, fødevarer- og medicinalindustrien. Enkelte fjernkølingsnet eksisterer i Danmark herunder i Høje Taastrup og København.

Principper for termisk energilagring

Termisk energilagring omfatter lagring fra kuldegrader til over 1000°C med inddeling i principper baseret på, hvordan lagringsmediet ændrer tilstandsform ved opvarmning eller nedkøling. Stoffer er normalt i fast, flydende eller gasformig tilstandsform. Faste stoffer bliver flydende og senere til gasser ved opvarmning, mens køling har den modsatte effekt.

- Sensibel. Lagringsmediets evne til at lagre varme (varmekapacitet) udnyttes ved skiftende temperatur, men mediet skifter ikke fase, dvs. vand forbliver vand og fordamper ikke til gas.
- Latent. Lagringsmediet skifter fase under opvarmning fra fast form (f.eks. is) til flydende (vand) eller fra flydende (f.eks. flydende salt) til fast form (salt).
- Sorption. Varme lagres via varmeabsorberende processer, hvor gas desorberer fra et fast eller flydende stof. Varmen frigives, når gassen binder på et fast (adsorption) stof eller i en væske (absorption). Adsorption er velegnet til opbevaring af mindre energimængder med hurtig op- og afladning, mens absorption er velegnet til opbevaring af større energimængder over længere tid.
- Termokemisk. Kemiske reaktioner mellem stoffer kan lagre varme. Tilførsel af varme kan splitte stoffer i mindre, separate bestanddele, som opbevarer varmen. Varmen bliver frigivet, når bestanddelene bliver bragt sammen og reagerer, hvilket gendanner det oprindelige stof.

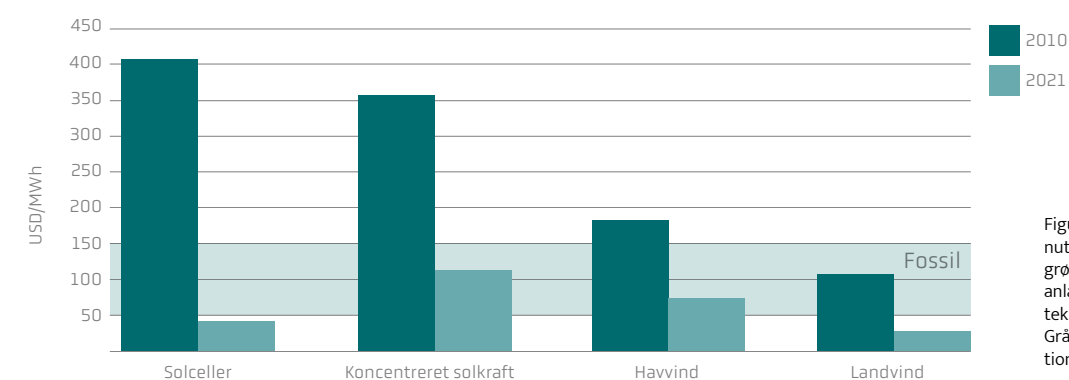
De fire principper har forskellige fordele, ulemper og anvendelsesområder, hvorfor den optimale løsning afhænger af tekniske, økonomiske og miljømæssige parametre. Sensibel varmelagring er veludviklet, mens de øvrige principper mestendels er på udviklingsstadiet, har flere udfordringer og større omkostnings- og pladsreduktionspotentialer i forhold til sensible lagringsteknologier [19]. Tabel 1 viser eksempler på forskellige lagringsløsninger opdelt efter temperaturinterval. Tabellen viser, at forskellige termiske lagringsteknologier kan tilfredsstille temperaturbehovene [20] [21].

Anvendelser af termisk lagring i Danmark

Kommercielle kuldelagre bliver brugt af LEGO og andre procesindustriens plaststøbemaskiner (12-18°C) samt supermarkeder (omkring 0°C) for at udjævne belastning af køleanlæg og drifte dem mere energiøkonomisk. Kuldelagre kan også finde anvendelse hos datainfrastruktur, som bliver vist senere i dette afsnit som *Case 1 - DTU optimerer faseskiftende materials høje energitæthed til kompakt og decentral energilagring*.

Varmelagringsteknologier er især velegnet til dags- og månedslagring med op- og afladningseffekter på kW til hundredvis af MW og energilagringsskapacitet på kWh til flere GWh. Teknologierne har markante skalafordele. Det vil sige, at lagringsprisen per kWh er mindre desto større anlæg. Teknologiuudvikling kan markant sænke energiprisen for umodne og dyre teknologier på lavt teknologimodenhedsniveau (TRL, technology readiness level) som vist i figur 1, hvor energiproduktionsprisen for solceller faldt med 90% på cirka ti år.

Umodne varmelagringsteknologier har lignende prisreduktionspotentialer som ved realisering kan blive konkurrencedygtige eksportvarer [27]. Varmelagring er derimod ikke velegnet til hurtig op- og afladning fra subsekund til timeniveau og i scenarier med lave energilagringssmængder, hvor batterier, superkondensatorer og svinghjul er mere velegnede.



Figur 1: Udvikling i gennemsnitlig nutidselproduktionspris (eng: LCOE) af grønne teknologier baseret på idriftsatte anlæg i 2010 og 2021 samt projekternes teknoøkonomiske specifikationer [24]. Gråt område viser fossilbaseret elproduktionsprisspændet.

Energilagring kan nedbringe CO₂-udledning fra varmeproduktion

Varmebehovet udgør 97% af det termiske behov i Danmark [25]. Fremover stiger kølebehovet betydeligt pga. køling af datainfrastruktur (syvfoldning i energibehov fra 2021 til 2030 [26]) og klimaforandringer [27].

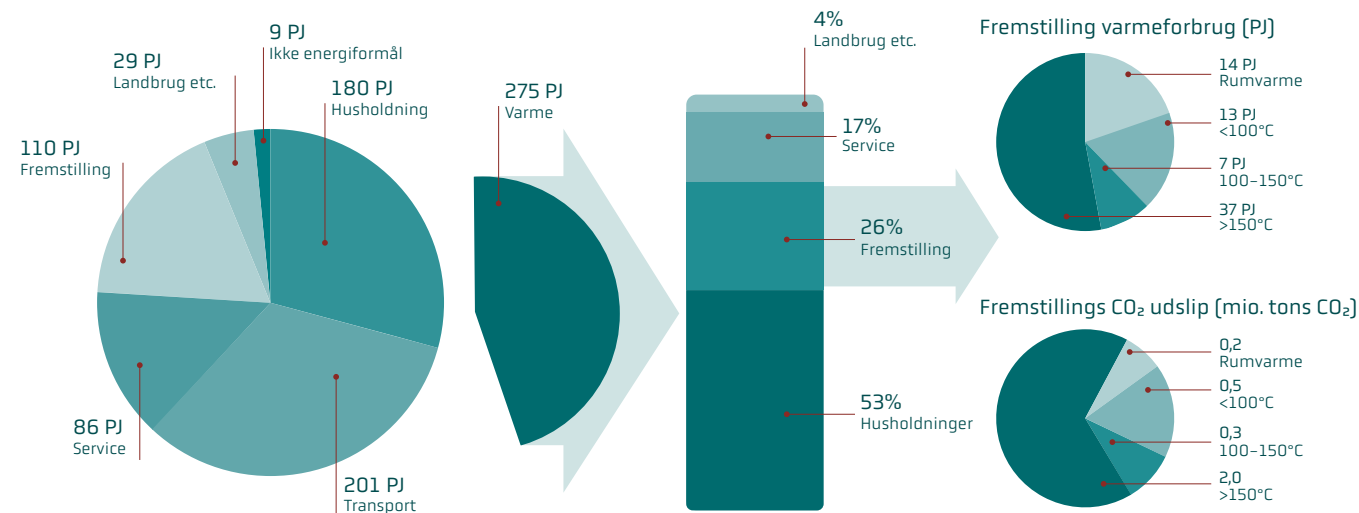
Termisk energilagring er opdelt i temperaturintervaller for at skelne mellem anvendelser (se tabel 1) og vise energi- og emissionsfordelingen ved forskellige temperaturer.

Husholdninger og servicesektoren efterspørger primært varme under 100°C, hvor kommercielle løsninger eksisterer som damvarmelagre og varmepumper f.eks. i integration med fjernvarme [28] [29].

Klimaaftrykket fra varmeforsyning under 100°C falder med elektrificering af både fjernvarmen og servicesektoren samt stigende andel vedvarende elektricitet, men der er et stort potentiale for at sætte skub i elektrificeringen [26].

Det kan ske gennem udvikling og optimering af fleksibel integration mellem varmelagre (f.eks. damvarme- og Phase Changing Material (PCM)-lagre) og varme fra vedvarende energi som f.eks. solfangere og eldrevne varmepumper. Optimering kan både accelerere udfasning af olie- og gasfyr (henholdsvis 65.800 og 336.000 stk. i 2022) og fossil energi i fjernvarmen [26]. Potentialet er markant, da en tredjedel af bygningsarealet bliver opvarmet med gas, olie, brænde og træpiller [30].

Fremstillingserhvervenes varmeforbrug dækker et større temperaturinterval fordelt cirka ligeligt over og under 150°C jf. øverste cirkeldiagram yderst til højre i figur 2. Klimaudfordringen er, at fossile brændsler dækker varmebehovet ved især høje temperaturer, der kræver meget energi at opnå. Varme over 150°C udgør derfor 2/3 af emissionerne jf. nederste diagram til højre i figur 2. Højere temperatur stiller ekstra krav til lagringsmaterials holdbarhed, isoleringsevne mv. Teknologier til varmelagring og -forsyning ved høj temperatur er i gang, men der er pt. få kommercielt udviklede grønne teknologier hertil. Tidskrævende og vanskelig markedsmodning af teknologierne medfører, at klimaaftrykket ved højtemperaturprocesser forbliver højt fremover, hvis ikke teknologiuudvikling og markedsmodning bliver fremmet. Biomasseafbrænding kan til dels erstatte fossile brændsler, men biomasse er en knap ressource og bør reserveres til sektorer uden teknoøkonomiske grønnere alternativer. Højtemperaturvarmepumper kan adressere varmebehov mellem



Figur 2: Danmarks endelige energi- og varmeforbrug fordelt på sektorer i 2022 samt temperatur- og emissionsfordeling for fremstillingshverv (ekskl. raffinaderier) baseret på data fra Energistyrelsen.

100°C og 250°C [31], mens f.eks. solvarme, elvarme, industriel overskudsvarme inkl. PtX m.m. også kan imødekomme varmebehov over 250°C, hvor varmepumpers effektivitet gør dem mindre attraktive.

Samlet set er det bydende nødvendigt at udvikle, opskalere og optimere termiske energilagrings- og konverteringsteknologier til anvendelser både over og under 100°C for at reducere klimaaftrykket hurtigere gennem optimeret udnyttelse og accelereret indpasning af sol- og vindenergi.

Danske styrkepositioner

Danmark er førende inden for flere termiske lagringsteknologier og har velfungerende løsninger til lagring af varme under 100°C, men optimering af teknologierne er nødvendig for at levere varme og kulde i intelligent og fleksibelt samspil med vejrafhængig vedvarende energi.

Varmelagringsløsninger over 100°C til industrielle højtemperaturprocesser og dampbaseret elproduktion er generelt fraværende og udgør et uindfriet potentiale, som Danmark kan udnytte. Særligt industrien kalder på omkostningseffektive varmelagringsløsninger, som flere danske aktører arbejder ihærdigt på, hvilket fremgår af konkrete eksempler sidst i dette kapitel.

Danmark er aktiv bidragsyder til internationale samarbejder herunder det internationale energiagenturs (IEA) ekspertpanel, tekniske og økonomiske arbejdsgrupper inden for IEA's energilagringsplatform (Energy Storage Tasks 32, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 43) [32]. Dertil er danske universiteter og virksomheder drivende kræfter i internationale forsknings- og udviklingsprojekter inden for termisk lagring.

Der findes kompetente danske løsninger, men der er brug for opskalering og markedsmodning. Gensidige samarbejder mellem vidensinstitutioner og industri kan via udviklings- og demonstrationsprojekter generere praktiske erfaringer og viden, som kan gøre modelleringsværktøjer mere virkelighedstro. Industrien efterspørger et teknøkonomisk overblik, hvilket frit tilgængelige modelleringsværktøjer kan efterkomme.

Vi har udvalgt fire danske termiske løsninger fremlagt i rækkefølgen lav til høj lagringstemperatur, som har betydning for anvendelsen. Højere temperatur øger pris, driftskompleksitet og risikoen for korrosion, hvilket stiller højere krav til materialer, pumpeudstyr og teknologiudvikling. For at understøtte udvikling af højtemperatur varmelagre og relaterede løsninger er der brug for mere finansiering til risikovillige samarbejder.

Teknologierne er på forskellige udviklingstrin og dermed afstand til markedet (TRL).

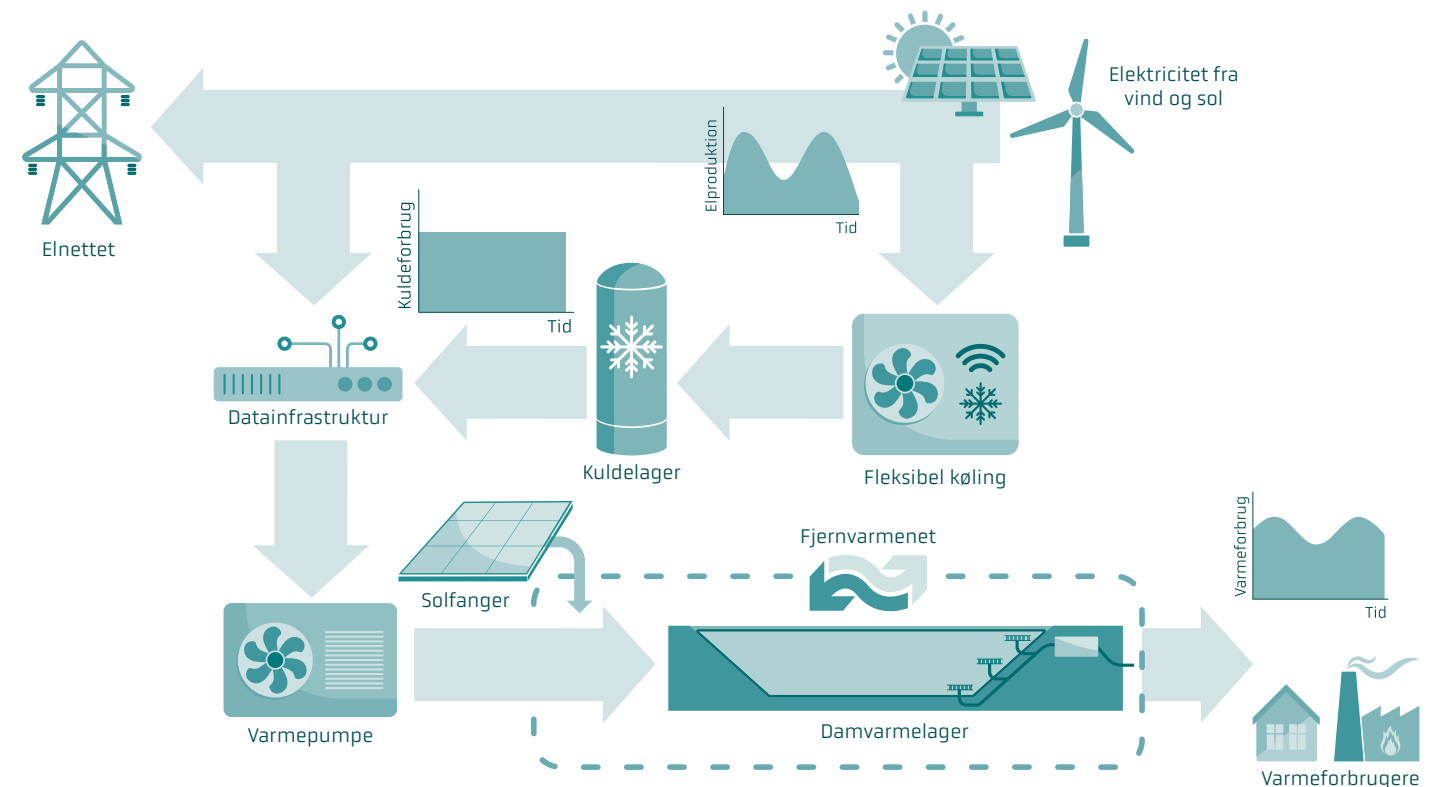
I dansk perspektiv fordeler de sig på følgende vis:

- Lav (1-3): Termokemiske processer som hydrering og dehydrering af salt i vand
- Mellem (4-6): Smeltet salt, varme sten, latent/faseskiftende materialer
- Høj (7-9): Damvarmelagre er Danmark førende i og har store eksportmuligheder

Case 1

DTU optimerer faseskiftende materialers høje energitæthed til kompakt og decentral energilagring

DTU Construct arbejder inden for termisk lagring og har stor viden om faseskiftende materialer, der indgår i bygningsintegreret lagring af varme eller kulde. Institutet samarbejder tæt med DTU Compute og DTU Management og udvikler intelligent styring, der øger pålidelighed og tilpasser elforbrug til lave elpriser og perioder med mest vedvarende energi.



Figur 3: Elproduktion fra vind og sol varierer, men et fleksibelt kuldager kan udjævne variationen og levere efterspurgt konstant køling til datainfrastruktur, som udleder overskudsvarme. Varmepumper kan nyttiggøre overskudsvarmen og sende den til fjernvarmenettet. Dog er varmemeforbruget varierende, og derfor kan det være fordelagtigt at lagre varmen fra varmepumper og solfangere i et damvarmelager (eller akkumuleringsstanke) forbundet til fjernvarmenettet.

UDFORDRING

Energistyrelsen forventer, at bygninger uden tilslutning til fjernvarme- og fjernkølingsnet sammen med forbruget fra datainfrastruktur tegner sig for 13% af Danmarks elforbrug i 2030 [26]. Eldrevne varmepumper og køleanlæg kan forsyne bygninger og relateret datainfrastruktur med henholdsvis grøn varme og kulde ved at forbruge vedvarende elektricitet. Ulemperne ved elbaseret varmeforsyning og -lagring er, at teknologierne pt. ikke er tilstrækkeligt veludviklede til effektiv, intelligent og fleksibel drift i bygninger, mens lagrene er udfordret af snævert temperaturinterval og begrænset plads.

LØSNING

I "Cool-Data"-projektet bliver salthydrat og organiske materialer testet separat i kuldagerprototyper (udviklet af Cool Energy Aps), der vha. AI muliggør fleksibel køling af teknik- og serverrum [33] [34]. Projektet er støttet af Innovationsfonden. De anvendte PCM-materialer smelter ved 15°C, mens lagerets driftstemperatur varierer mellem 10°C og 20°C, da smeltning indebærer stor energioverførsel. De testede kuldagre kan lagre fem gange mere energi per volumen (energitæthed) end vandtanke mellem 10°C og 20°C. Integration af kuldageret med elforsyning fra vedvarende energikilder, køleenhed og datainfrastruktur er vist i figur 3.

Et andet salthydrat kan lagre varme fra varmepumper og solfangere i 100-200 liter tanke, hvor varmen smelter salthydratet ved 58°C [35]. Salthydratet har lavere varmetab og højere energitæthed end varmtvandsbeholdere.

POTENTIALE

PCM-løsningen er på prototype-stadiet (TRL 4-5) med større skalademonstration som det næste trin. Faseskiftende materialers akilleshæl er begrænset varmeledningsevne og høj pris ift. sensible varmelagringsmaterialer. Forskningen fokuserer derfor på at optimere varmeoverførsel og på systemintegration. Hensigten er at øge værdi af lageret, herunder at reducere pladsforbrug og sikre varmeforsyning ved næsten konstant temperatur.

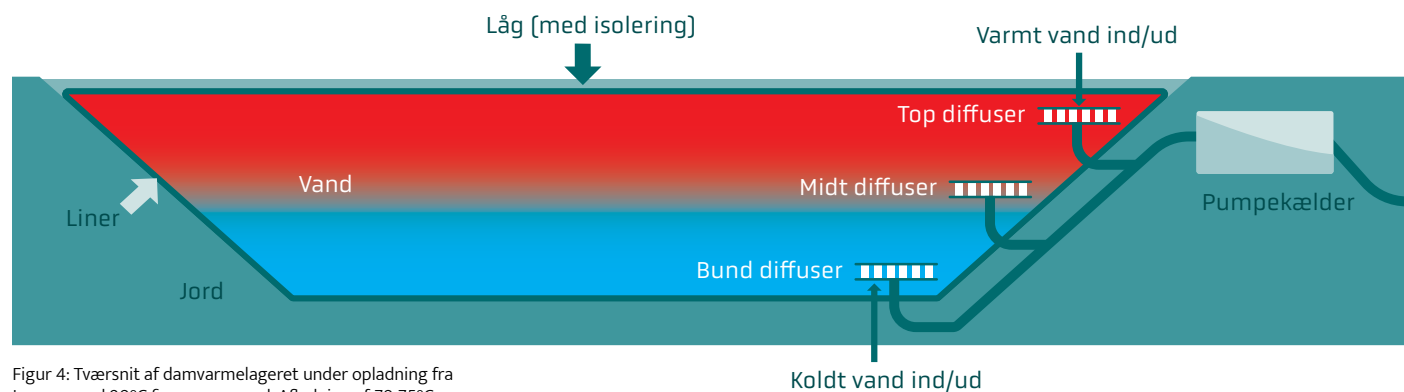
PCM kan komme tættere på markedet vha. produktudvikling, høje og varierende elpriser, øget værdisætning af forsyningssikkerhed og efterspørgsel efter grøn varme.

Mere information:
www.construct.dtu.dk og cool-data.dtu.dk
 Gerald Englmair, adjunkt, DTU Construct

Case 2

Fleksibelt og innovativt damvarmelager giver billigere og grønnere varme til fjernvarmekunder

I Taastrup er etableret et stort damvarmelager, der kommercielt blev sat i drift i februar 2023. Fjernvarmeselskaberne VEKS og Høje Taastrup fjernvarme står bag finansieringen. PlanEnergi er primær rådgiver og har mere end 30 års erfaring med at konceptudvikle damvarmelagre i intelligent integration med bl.a. fjernvarme. Aalborg CSP har designet og leveret lagerets innovative låg, mens DTU Construct er involveret i videnskabelige undersøgelser af bl.a. vandtemperaturfordeling, varmetab og materialeudvikling over tid. Projektet er EUDP-støttet med en bevilling til 2025.



Figur 4: Tværsnit af damvarmelageret under opladning fra toppen med 90°C fjernvarmevand. Afladning af 70-75°C fjernvarmevand sker til Høje Taastrup fjernvarme. Lageret er isoleret fra den omkringliggende jord via en liner i bunden og siderne samt et låg i toppen. Varmt vand er lettere end koldt og sørger for en temperaturforskel ned gennem vandlageret. Låget er designet til at bortlede luft, vand- og fugtansamlinger.

UDFORDRING

Projektets udfordringer har været hindring af korrosion af ind- og udløb, temperaturbegrænsning for membraner og deres holdbarhed ved den høje driftstemperatur (90°C året rundt) samt udvikling af kosteffektive og holdbare løsninger. Alternative lagre til projektets damvarmelager er ståltanke, som er dyrere i samme skala.

LØSNING

Det fleksible damvarmelager, der er vist i figur 4 og er på 70.000 m³, tilbyder kosteffektiv lagring af overskudsvarme og overskydende vedvarende energi med henblik på anvendelse i perioder med varmeunderskud. Lageret kan fjerne op til 15.000 tons CO₂ per år [36]. Lagerets kapacitet er 3.300 MWh varmt vand og kan op- og aflade med op til 30 MW fra henholdsvis VEKS' transmissionsnet og Høje Taastrups fjernvarmenet. Projektets succes beror dels på en nyudviklet lågløsning med effektiv afvanding og dampdiffusion og dels på forskningssamarbejde mellem polymerproducenter og forskningsinstitutioner, som har ført til holdbare, varmetolerante og specialudviklede membraner bestående af polypropylene. Løsningerne resulterer i lang levetid (>30 år), lavt energitab (<5% per år) og elprisleksibel drift med 25-30 årlige op- og afladninger og årligt provenu på 6-7 mio. kr.

POTENTIALE

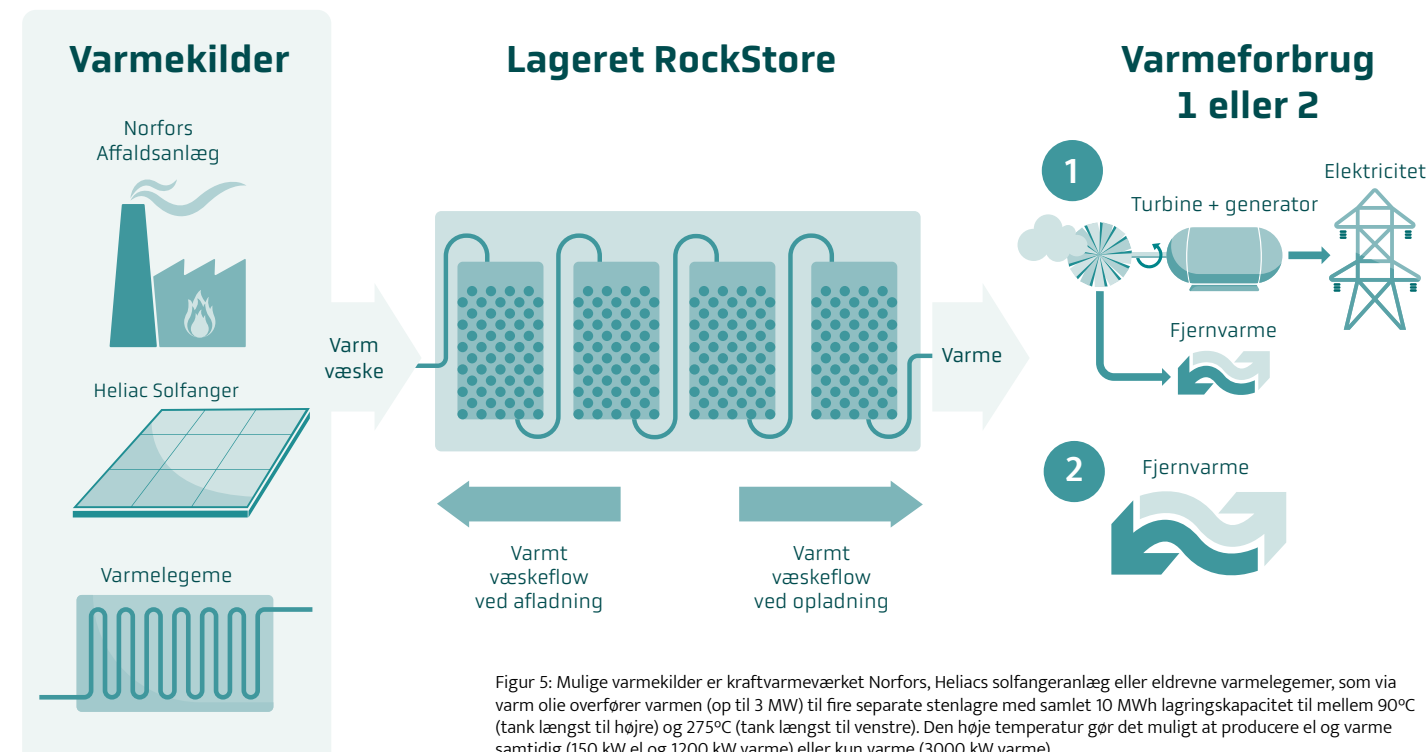
Damvarmelageret i Taastrup består af komponenter, der er kommercielt tilgængelige og velafprøvede. Nyt er ugentlig op- og afladning i fleksibelt samspil med eldrevne varmeproduktion og -forbrug samt et nydesignet, holdbart og varmeisolerende låg. Projektet består af kommercielle bestanddele sammensat på en ny måde, hvilket medfører TRL-niveau 8. Estimer angiver projektets kommercielle potentiale til at være 1 mia. kr. i Danmark og 10-15 mia. kr. i Europa særligt i Tyskland, Sverige, Finland og Østeuropa, hvor udbredelse af fjernvarme i Europa er størst [37].

Mere information:
www.planenergi.dk og www.aalborgcsp.dk
Geoffroy Gauthier, projektleder, PlanEnergi
Per Alex Sørensen, teamleder, PlanEnergi
Jonas I. Sørensen, produktmanager, Aalborg CSP

Case 3

Heliac leverer kosteffektiv, CO₂-fri og fleksibel lagring af vedvarende og overskydende varme i stenlager

Heliac er etableret i 2014. Virksomheden udvikler og patenterer løsninger til innovative, kosteffektive og justerbare solfangere, som i dag kombineres med energilagring i sten (RockStore) og intelligente integrationsløsninger, der optimerer drift af solfangere ift. energiforbrug og -lager.



Figur 5: Mulige varmekilder er kraftvarmeværket Norfors, Heliacs solfangeranlæg eller eldrevne varmelegemer, som via varm olie overfører varmen (op til 3 MW) til fire separate stenlagre med samlet 10 MWh lagringskapacitet til mellem 90°C (tank længst til højre) og 275°C (tank længst til venstre). Den høje temperatur gør det muligt at producere el og varme samtidig (150 kW el og 1200 kW varme) eller kun varme (3000 kW varme).

UDFORDRING

Anlæg, der håndterer affaldsforbrænding og industrielle højtemperaturprocesser, udleder i dag overskudsvarme ved høj temperatur til atmosfæren uden nyttiggørelse bl.a. pga. meget få kommercielle og effektive højtemperatur varmelagre.

Lønsomheden af VE-anlæg er belastet af deres vejrafhængige energiproduktion. Varmelagre kan udjævne mismatch mellem ukontrollabel VE-produktion og energiforbrug, men det forudsætter intelligent drift af lageret, hvis det skal indgå i fleksibelt og lønsomt samspil med variabel varmeforsyning fra solfangere, elvarme og industriel overskudsvarme. Hertil kommer at anvendelsen af højtemperatur restvarme stiller ekstra krav til isolering, korrosionsbestandighed og varmetolerance af udstyr og materialer.

LØSNING

Heliac har udviklet et fleksibelt og skalerbart stenlager, RockStore, med forventet driftsstart i 2024, der bygger på tidligere lignende varmelagre i mindre skala. Opvarmningskilden er vedvarende eller overskydende energi, som via en varmebærende olie overfører varmen til stenlagertanke som vist i figur 5. Stenlageret er unikt, da det består af lettilgængelige, miljøvenlige, holdbare og kosteffektive materialer med et årligt tab på 7-10% af den lagrede energimængde og en estimeret levetid på 15-20 år. Den producerede varme kan anvendes som procesvarme til industri, damp til elproduktion og fjernvarme. RockStore kan øge udnyttelsesgraden af vind- og solanlæg og er derfor velegnet til at blive integreret med VE-anlæg. Industrier og kraftvarmeværker kan bruge lageret til at lagre overskudsvarme til senere el- og varmeproduktion enten til egetforbrug eller til markedet.

POTENTIALE

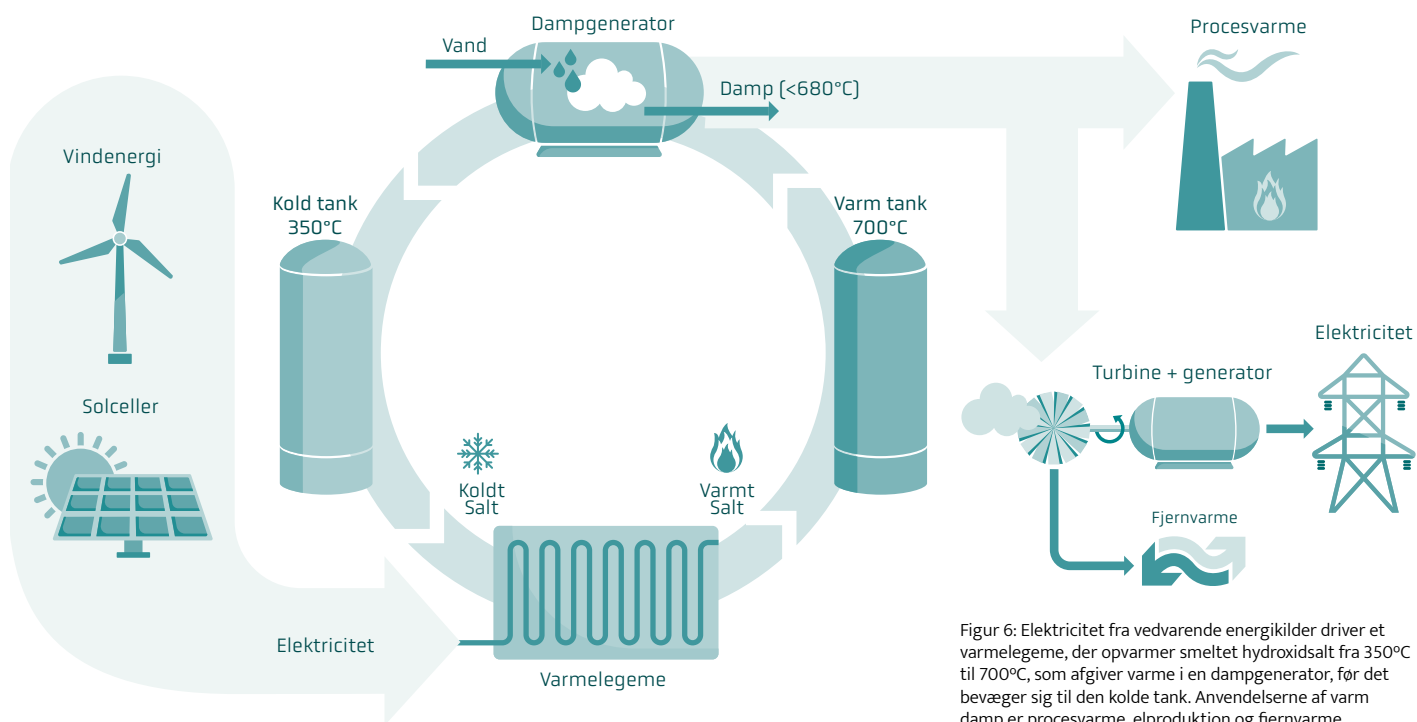
Heliac undersøger i et EUDP-projekt, hvordan Norfors' årlige overskudsvarme på 10-30 GWh kan lagres i RockStore for senere anvendelse. Energilageret skal udgøre fundamentet for senere opskalering til GWh-størrelse. Udover Norfors indgår en lang række industripartnere og videnspartnere i projektet. Lagring ved høj temperatur kræver hårdføre og holdbare materialer, som Heliac konstant arbejder på at forbedre og optimere. Opskalering og videreudvikling af RockStore fra demonstrationsfase og TRL-niveau 6 er næste skridt. Men det kræver flere midler, partnerskaber og regulatorisk frihed. Heliac har indgået et partnerskab med Forsyning Danmark med at understøtte næste udviklingstrin, hvilket inkluderer mere end 30 gange større lagre end vist i figur 5.

Mere information:
www.heliac.dk
www.energiteknologi.dk/projekter/rockstore
Elie Najim, teknisk projektleder, Heliac
Dan Kofoed, projektleder, Heliac

Case 4

Hyme lagrer VE-el i smeltet salt til elforsyning og industriel procesvarme

Hyme er etableret i 2021 og har knap 40 ansatte. Virksomheden udvikler og kommercialiserer en ny type energilagrer baseret på hydroxidsalte. Hyme udspringer af Seaborg Technologies, der gennem syv år har forsket i hydroxidsalte og udviklet en ny metode, som gør det muligt at kontrollere saltets korrosive natur. Resultatet er et mere skalerbart og kosteffektivt termisk energilagrer. Hymes lagringskoncept kombinerer moden smeltet salt-teknologi og en ny type salt med forbedrede termiske egenskaber. Visionen er at bygge et storskalaanlæg med lagringskapacitet på op til 1-2 GWh for at sikre stabil forsyning af el og varme til byer og industri i samarbejde med øvrige operatører som eksempelvis Alfa Laval Aalborg Header & Coil A/S.



Figur 6: Elektricitet fra vedvarende energikilder driver et varmelegeme, der opvarmer smeltet hydroxidsalt fra 350°C til 700°C, som afgiver varme i en dampgenerator, før det bevæger sig til den kolde tank. Anvendelserne af varm damp er procesvarme, elproduktion og fjernvarme.

UDFORDRING

Industriektoren efterspørger løsninger til deres højtemperaturprocesser (over 200°C), som er vanskelige at elektrificere rentabelt i dag. Derfor bliver industriens behov for højtemperatur varme og damp i høj grad imødekommet ved afbrænding af klimabelastende fossile energikilder.

LØSNING

Hyme anvender hydroxidsalte (afløbsrens) til at lagre vedvarende el som varme ved, at eldrevne varmelegemer opvarmer smeltet salt fra 350°C til 700°C, som vist i figur 6. Afladning sker ved at pumpe 700°C smeltet salt igennem en varmeveksler, der opvarmer vand til maksimalt 680°C damp. Industrier kan bruge dampen til at producere procesvarme. Dampen kan også blive omdannet til elektricitet og varme via en damp-turbine med tilkoblet generator. Elproduktionen udgør maksimalt 40% af energiproduktionen, mens varme udgør resten som vist i figur 6. Saltets fordele er, at det er sikkert, lettilgængeligt, billigt, energitæt og energieffektivt i forhold til lagring og varmeoverførsel. Lageret er skalerbart fra 0,1-2 GWh og kan fungere med daglig op- og afladning med 1% lagringstab. Arealkravet til saltlageret er en tiendedel og en tredivedel af henholdsvis Li-ion-batterier og vandkraft ved samme energilagringsmængde. Storskala termisk energilagring kan forsyningssikkert levere grøn varme og damp ved høj temperatur ved fleksibelt at lagre varme og damp, der genereres, når elprisen er lav.

POTENTIALE

Hyme er i gang med at demonstrere to pilotprojekter, som er 1 MWh smeltet saltlager i Esbjerg (MOSS EUDP-projekt) og 25 MWh smeltet saltlager i Rønne (2LIPP EU-Horizon projekt). Forventningen er, at MOSS er i drift i 2023, mens 2LIPP er i drift i 2024. Efter 2025 er ambitionen at etablere kommercielle lagre i GWh-størrelsen. MOSS og 2LIPP skal demonstrere konceptet på MWh-skala over længere tid samt hæve tidligere testet driftstemperatur fra 600°C til 700°C. Lagerteknologien er på TRL niveau 6. Succesfulde tests kan danne basis for udrulning af storskala, termiske energilagrer i Danmark til gavn for forsyningssikkerheden, grøn omstilling af højtemperaturindustri og udnyttelse af vedvarende energianlæg.

Mere information:
<https://www.hyme.energy/>
Karine Blandel, seniorforretningsudvikler, Hyme

Opsummering af termiske cases

De fire lagringsteknologier er opsummeret i tabel 2 efter seks kategorier og dækker et bredt temperatur- og anvendelsesområde. Lagringskapaciteterne er markedsrelevante og viser, at danske energilagringsteknologierne har et lovende potentiale, men de mangler at overkomme svære udfordringer, før kommercialisering er en realitet.

Tabel 2: Karakterisering af fire danske termiske energilagringsteknologier.

Case	Temperatur [°C]	TRL	Input	Output	Anvendelse	Lagerkapacitet opnået/mål
Kuldelager med PCM salt	Min: 10 Max: 20	4,5	Kulde fra eldrevet køleenhed	Kulde	Datainfrastruktur Bygninger, service - og industri erhverv	15 / 50-100 kWh per modul
Damvarmelager	Min: 45 Max: 90	8	Fjernvarme	Fjernvarme	Fjernvarmenet	3300 MWh
Varmersten	Min: 40 Max: 300	6	Overskudsvarme Solvarme VE-varme fra varmelegeme	Procesvarme Fjernvarme	Elproduktion og systemydelser Industri Fjernvarmenet	10 MWh/ +350 MWh
Smeltet salt (NaOH)	Min: 350 Max: 700	6	VE-varme fra varmelegeme	Procesvarme Fjernvarme Elektricitet	Elproduktion og systemydelser Industri Fjernvarmenet	1 / 400-1200 MWh per modul



BATTERIER – EN VIGTIG BRIK I DEN GRØNNE OMSTILLING

Batterier kan accelerere vejen mod et forsyningssikkert og klimaneutralt energisystem med høj andel af varierende vedvarende energi ved at fremme elektrificering af transportsektoren, reducere kortvarige, lokale, ubalancer i elnettet og korttidslagre overskydende vedvarende elektricitet. Det reducerer klimaaftrykket, forbedrer udnyttelsen af energiresourcer og giver høj forsyningssikkerhed trods høj VE-andel. Realiseringen kræver udvikling af bæredygtige batterier og effektiv opskalering af batteriproduktion, som allerede er i fuld gang på globalt plan.

Batterier kan indgå i mange applikationer, hvoraf de vigtigste er listet herunder:

1. Energilagring ifm. elektrisk transport som personbiler, busser, lastbiler, færges m.m. evt. med intelligent kobling til elnettet (Vehicle-to-Grid)
2. Systemydelser ved at balancere elnettets spænding og frekvens på sekund til timeniveau
3. Backup elforsyning i forbindelse med strømafbrydelser i stedet for fossildrevne anlæg
4. Lokal ellagring af vind- og solenergi til perioder med større elbehov kan understøtte systemintegrationsløsninger, udrulning af lynladere og reducere både omkostningstung elnetudbygning og lokale flaskehalse
5. Styrke økonomien i energifællesskaber ved at maksimere egenproduktion og -forbrug af vedvarende energi samt anvendelser bag elmåleren som virksomheders virtuelle kraftværker m.m.

Batterier har meget lavere energitæthed sammenlignet med fossile brændsler, hvorfor de er velegnet til let transport over kortere distancer. EU kræver, at nye lette køretøjer solgt fra 2035 er emissionsfrie [38], mens danske lastbiler bliver pålagt en kilometerbaseret vejafgift fra 2025 [39]. Der er afsat støttepuljer til ladeinfrastruktur for let og tung transport [40], og der er oprettet støttepuljer til elektrisk indenrigssøfart m.m. [41]. Tiltagene tilskynder til emissionsfrie transportmidler og bidrog til, at det årlige elbilsalg for første gang oversteg 30.000 biler i 2022, mens færgedrift til Samsø og Als er elektrisk om få år [42].

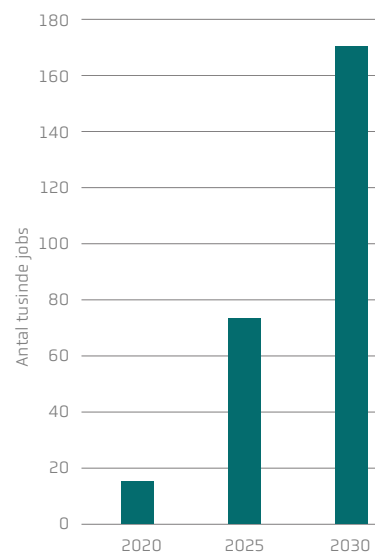
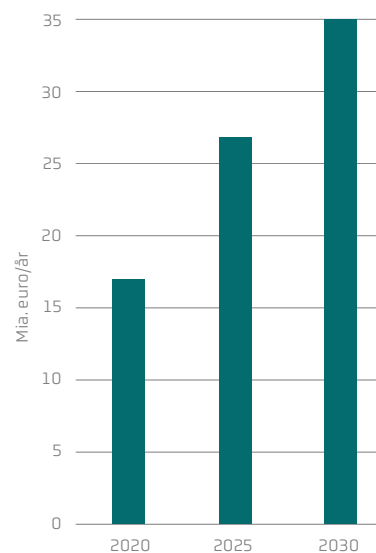
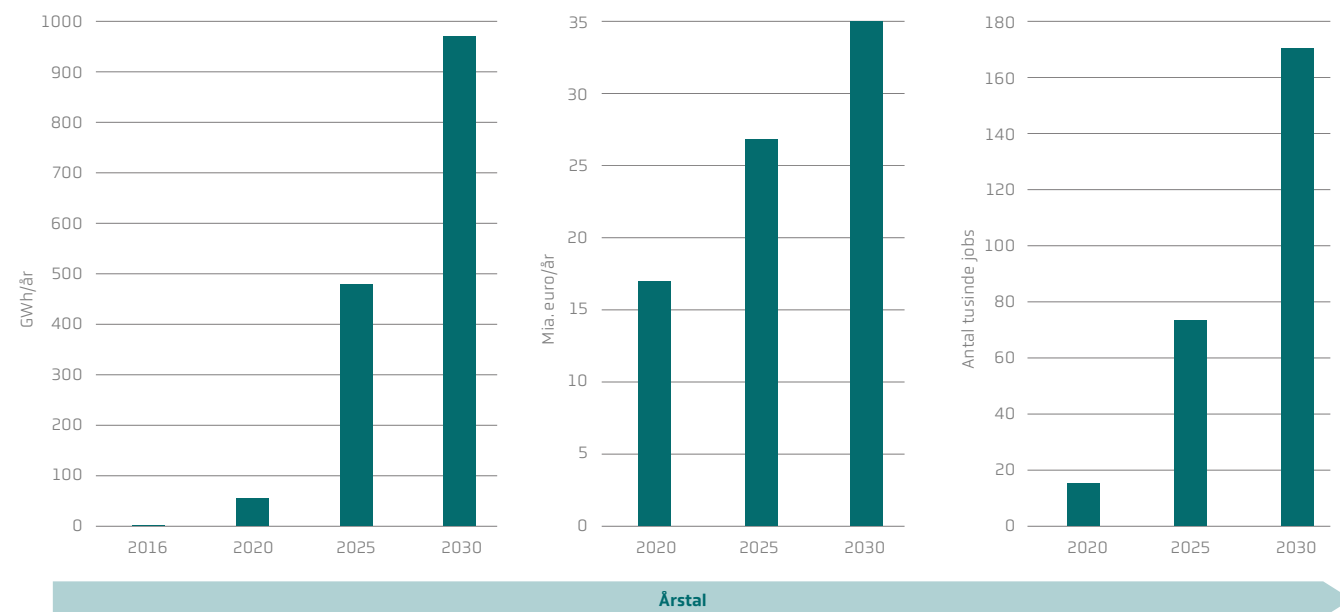
Ladeinfrastruktur er essentielt for at elektrificere transportsektoren, da eldrevne transportformer har kortere rækkevidde end fossildrevne. Fremskrivninger viser entydigt, at batteribehovet til mobil fremdrift står for langt størstedelen af det hastigt stigende behov (omkring 90% i 2030) efterfulgt af energilagring og til sidst forbrugerelektronik [48].

Konsekvensen er, at behovet for batteriråstoffer som kobolt og litium meget snart overstiger produktionskapaciteten [43]. Løsningen er at udvikle nye batteriteknologier baseret på mere lettilgængelige og ikke-kritiske råstoffer.

Forventningen er, at den europæiske batteriproduktionskapacitet er tyve gange højere i 2030 ift. til 2020, da der samtidig er et stort stigende behov for batterier jf. figur 7. Batteribehovet medfører både et stort vækstpotentiale i form af en fordobling i omsætning fra 2020 til 2030 jf. figur 8 og høj jobskabelse inden for sektoren i EU jf. figur 9. Investorer følger fremskrivningerne, da energilagring udgør den største andel (26%) af globale investeringer i grønne teknologier. I kategorien energilagring, står batterier for mere end halvdelen (56%) af investeringerne [44].



I samarbejde med Syddansk Universitet og Dansk Batteriselskab samlede DaCES repræsentanter fra alle dele af værdikæden til Danish Battery Summit i Sønderborg den 2. marts 2023.



Figur 7: Fremskrivning af batteriproduktionskapaciteten i EU's 27 lande [45].

Figur 8: Fremskrivning af omsætning i batterisektoren i EU, Storbritannien, Island, Liechtenstein, Norge og Schweiz [46].

Figur 9: Fremskrivning af jobskabelse over hele batteriværdikæden blandt EU's 27 lande [47].

Den danske batteriværdikæde

Danske batteriaktører er aktive inden for en bred vifte af genopladelige batteriteknologier, hvor litium-ion (Li-ion) batterityper er de mest udbredte og dominerende med anvendelse inden for primært elektriske køretøjer og sekundært stationær el-lagring og elektronik [48]. Li-ion batterier har relativt høj energitæthed, høj effektivitet, lang levetid og lav selvafladning (lavt tab over tid) i forhold til andre batterityper. Dog er råstoffer til nutidens Li-ion batteriteknologi omkostningstunge og miljøbelastende, hvilket et eksponentielt stigende behov (se figur 7) forværrer. Stationære batterier er mindre udbredte end batterier til mobile applikationer og har andre krav, hvilket skaber markedspotentiale for nye batterityper.

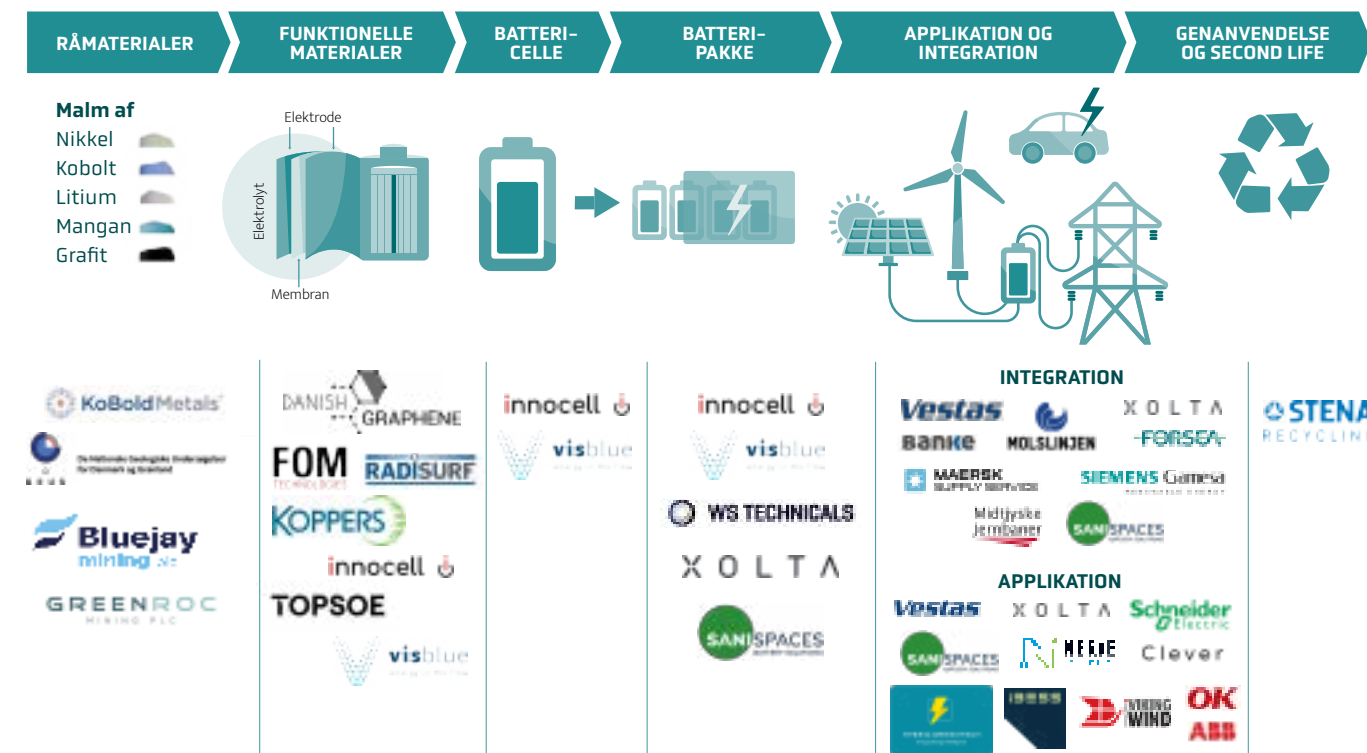
Danske virksomheder og vidensinstitutioner arbejder intenst på at udvikle næste generations batterier med fokus på bæredygtighed, pris, lettilgængelige materialer, levetid, energitæthed samt styring og integrering med elproducerende og -forbrugende enheder. Heri indgår digitale og datadrevne optimeringsværktøjer til accelereret opdagelse, modellering og udvikling af bæredygtige og sikre batterimaterialer.

Arbejdet omfatter også udvikling af mere bæredygtige ion-batterier som koboltfrie Li-ion batterier og natrium-ion batterier samt flowbatterier til især stationær lagring pga. lang levetid og anvendelse af sikre og lettilgængelige råstoffer.

Danske batteriaktører er ligeledes konkurrencedygtige i at automatisere, teste og intelligent styre batterienergistyringssystemer (BESS) i integration med f.eks. elnettet, egenproduktion og -forbrug (virksomheder, boligforeninger m.m.). BESS kan øge udnyttelsen af egenproduceret strøm, reducere elprisforskelle ved at købe strøm billigt og sælge dyrt m.m.

Sammen med forskning- og vidensinstitutioner dækker batterivirksomheder i det danske rigsfællesskab store dele af den klassiske batteriværdikæde som vist med batteriværdikæden i figur 10. Værdikæden inkluderer råstofudvinding, udvikling af batteriernes inderste komponenter (funktionelle materialer) samt konstruktion af samlede batteriløsninger (battericelle og -pakke), der kan indgå i spil med små og store VE-anlæg (applikation). Kategorien ”integration” viser virksomheder inden for tilknyttede teknologier, som f.eks. udvikling og produktion af ladestationer og software til styring og monitorering af batteripakker.

Batterisektoren inkluderer også anerkendte forskere fra Danmarks Tekniske Universitet, Aalborg Universitet, Aarhus Universitet, Syddansk Universitet og specialister fra Teknologisk Institut. Dertil bidrager danske rådgivervirksomheder med kvalificering ift. design, optimering og realisering af batteriprojekter. Forskere, rådgivere og specialister samarbejder tæt med virksomhederne vist i figur 10, hvilket styrker den samlede danske batterisektor.



Figur 10: Eksempler på førende batterivirksomheder i det danske rigsfællesskab og deres placering i batteriværdikæden.

Materialer

Danmark har en lang tradition for forskning og udvikling i materialekemi, som også anvendes ved udvikling og studier af materialer til batterier herunder elektrokemisk aktive materialer (elektrode- og elektrolytmaterialer) og andre komponenter, der er grundlag for at optimere og forbedre batterier.

Danmark har en international styrkeposition inden for både teoretisk og eksperimentel karakterisering af batterimaterialers atomare strukturer samt computerberegninger koblet med kunstig intelligens, hvilket er afgørende for at undersøge og forbedre vigtige batteriegenskaber som energitæthed og levetid. Styrkepositioner har ført til, at Danmark ved DTU Energi leder det store EU-forskningsprojekt BIG-MAP.

Virksomheder har specifikke kompetencer inden for materialeudvikling og samarbejder ofte med universiteter om forskning og udvikling af batterimaterialer.

Celler

Fremstilling og test af celler er centralt for udvikling af batterimaterialer. VisBlue og Innocell er de eneste danske virksomheder med markedsrelaterede aktiviteter inden for henholdsvis flowbatterier og superkondensatorer. Li-ion produktion finder ikke sted i Danmark, da den offentlige støtte er ubetydelig sammenlignet med nabolande.

Grundet et hastigt voksende behov for at sikre forsyning af batterier til europæisk produktion af elbiler er der fuld gang i etablering og skalering af Li-ion celleproduktion i Europa. Udlandet kigger med interesse mod Danmark for at etablere Li-ion celleproduktion, da celleproduktion er energikrævende, og elektriciteten i Danmark har lavt CO₂-aftryk.

System til styring og drift af batterier (BMS)

Batteripakker kan ikke fungere uden et batteristyringssystem (BMS), som består af hardware og softwarekomponenter. BMS monitorerer cellernes spænding, strøm, temperatur og ladningstilstand for at undgå overbelastning og forlænge levetid.

Cellerne og BMS er derfor de afgørende komponenter i en batteripakke. Europæisk batteriregulering kræver BMS i alle batterier over 2 kWh fra midten af 2024 [49].

BMS kan bidrage til intelligent frakobling af ødelagte battericeller og derved undgå driftsstop, som kan gøre uoprettelig skade, hvis batterierne leverer køling ifm. transport, hvor kontinuert drift er altafgørende. BMS kan desuden accelerere udrulning af lynladere i Danmark, der leverer grøn strøm til elbilerne [50].

Energistyringssystem (EMS)

Danske batterivirksomheder og -operatører anvender specialudviklede software som energistyringssystem (EMS) for at opnå sikker, pålidelig og rentabel drift af batterier. EMS kommunikerer til batterisystemets komplekse hardware gennem en applikationsprogrammeret interface (API), hvorigennem måling og kontrol af hardwaren foregår. Nogle EMS kan optimere driften af batterisystemet ved at bringe digitale værktøjer som maskinlæring og algoritmer i spil. EMS kan eksempelvis regulere temperaturen i husholdninger ved at styre termostater.

Genbrug og genanvendelse af batterier

Genbrug (second life) er at foretrække frem for genanvendelse. Genbrug indebærer at give batteripakker ”nyt liv” f.eks. ved, at brugte elbilbatterier bliver anvendt til stationær lagring. Genanvendelse inkluderer nedknusning af batterierne til råstoffer, som bliver separeret og genanvendt.

EU’s ambitioner om øget selvforsyning af batterimaterialer og udvidelse af batteriproduktion nødvendiggør markant skalering af både genbrug og genanvendelse fra i dag ganske få procent til 70% litium i 2030 [51].

Styrkepositioner i den danske batterisektor

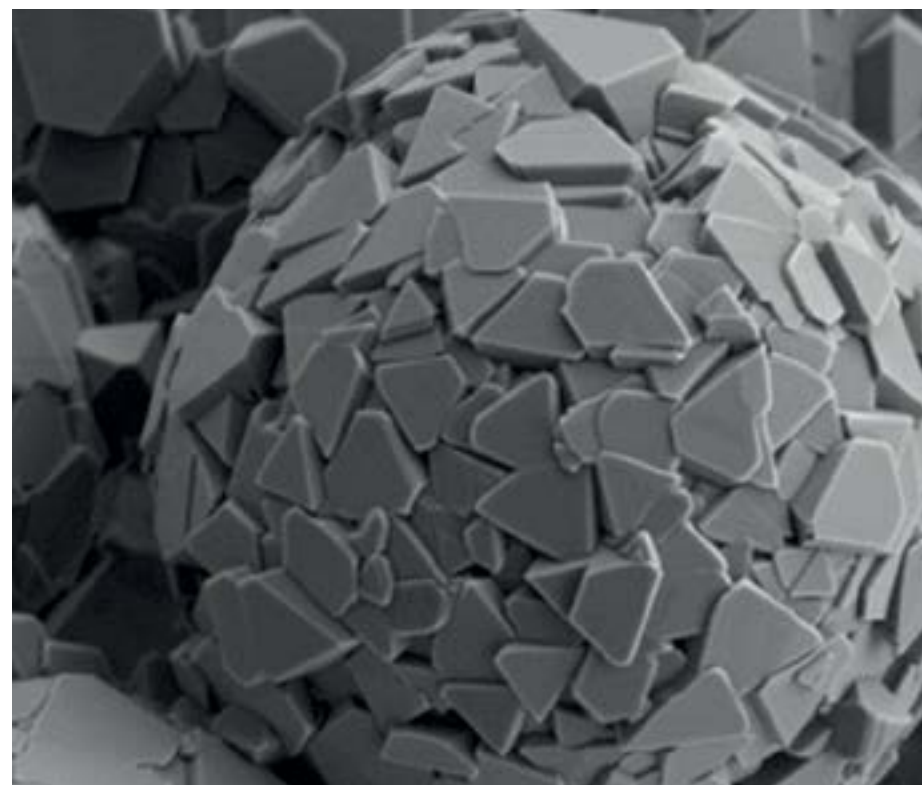
Danmark er i skarp, international konkurrence om udvikling af batterimarkedet. Vi skal prioritere ressourcerne klogt og strategisk, hvis vi skal blande os i det ledende felt. De danske batteriaktører fra industri og forskning er konkurrencedygtige på følgende områder, hvoraf tre cases efterfølgende går i detaljer med udvalgte virksomheder:

- Udvikling af nye, koboltfrie batterimaterialer og elektrolytter til litium- og natrium-ion-batterier (Topsoe, AU, DTU)
- Produktion af funktionelle karbonnanomaterialer og organiske materialer til innovativt design og coating af aktive batterimaterialer (Danish Graphene, FOM, Koppers, AU)
- Udvikling af nye, sikre og grønne batterityper som flow- og faststofbatterier (VisBlue, AU, DTU, SDU) samt energitætte, vandbaserede superkondensatorer (Innocell, SDU)
- Integrering, styring og automatisering af batteripakker med VE-anlæg evt. som virtuelle kraftværker (Vestas, XOLTA, Sanispace, AAU) eller med køletrailere (Bitzer)
- Direkte og komplet elektrificering af lette lastbiler (Banke)
- Intelligent energistyring, digitalisering og automatisering til optimering af kundens energiforbrug (Schneider Electric, AAU)
- Rådgivning og testfaciliteter til karakterisering, sikkerhedsevaluering og udvikling af batteridrevne løsninger fra lav effekt Internet of things (IOT)-enheder til højt ydende batterier i nettilsluttede energilagere eller elektrisk mobilitet (Teknologisk Institut, AAU, DTU)
- Teknologineutrale værktøjer som multiskala computermodeller, maskinlæring, autonome laboratorier og testfaciliteter, der accelererer opdagelse og design af nye batterier (DTU, SDU, AAU)

Case 1

Topsoe udvikler koboltfrie katoder med høj litiumudnyttelse

Virksomhedens ambition er at accelerere den grønne omstilling ved at bidrage med sin indgående erfaring om katalytiske processer, materialer og udvikling af grønne brændstoffer. Et af områderne, som Topsoe over en årrække har arbejdet med, er at udvikle og opskalere produktionen af næste generations batterimaterialer til litium-ion- og natrium-ion-batterier.



Figur 11: Visualisering af LMNO-partikler vha. scanningselektron-mikroskopi. De tætte runde partikler er udviklet for at kunne opnå høj energitæthed i LMNO-batterierne.

UDFORDRING

Ekspontielt stigende behov for batterier specielt til elbiler skaber allerede problemer med mangel og stigende priser på kritiske metaller til litium-ion-batterier. Det drejer sig bl.a. om kobolt og litium [52].

LØSNING

Topsoes litium-nikkel-mangan-oxid (LNMO)-materiale til litium-ion-batterier er koboltfrit med et relativt lavt indhold af nikkel og udnytter desuden litium meget effektivt som forklaret i figur 11. Dette gør LNMO til et meget konkurrencedygtigt og bæredygtigt alternativ til konventionelle batterimaterialer, der i dag anvendes i litium-ion-batterier. Fremstilling af LMNO-batterier ud fra batterimaterialet er desuden mere bæredygtigt, fordi opløsningsmidler, der er vanskelige at processere, kan erstattes med vand.

Topsoes LMNO-batteri nyder stor interesse pga. en vedvarende indsats for at forbedre og producere. I Frederikssund er et pilotanlæg under opførelse, der vil få en kapacitet på over 100 ton LMNO per år med forventet produktionsstart i 2023. Anlægget giver mulighed for at levere materiale til demonstrationsbatterier og produktionsmodne teknologier, der skal opføre produktion i industriel skala. Forventningen er, at anlægget i industriel skala bliver placeret i Nordeuropa og producerer 50.000 ton per år ved komplet udbygning.

POTENTIALE

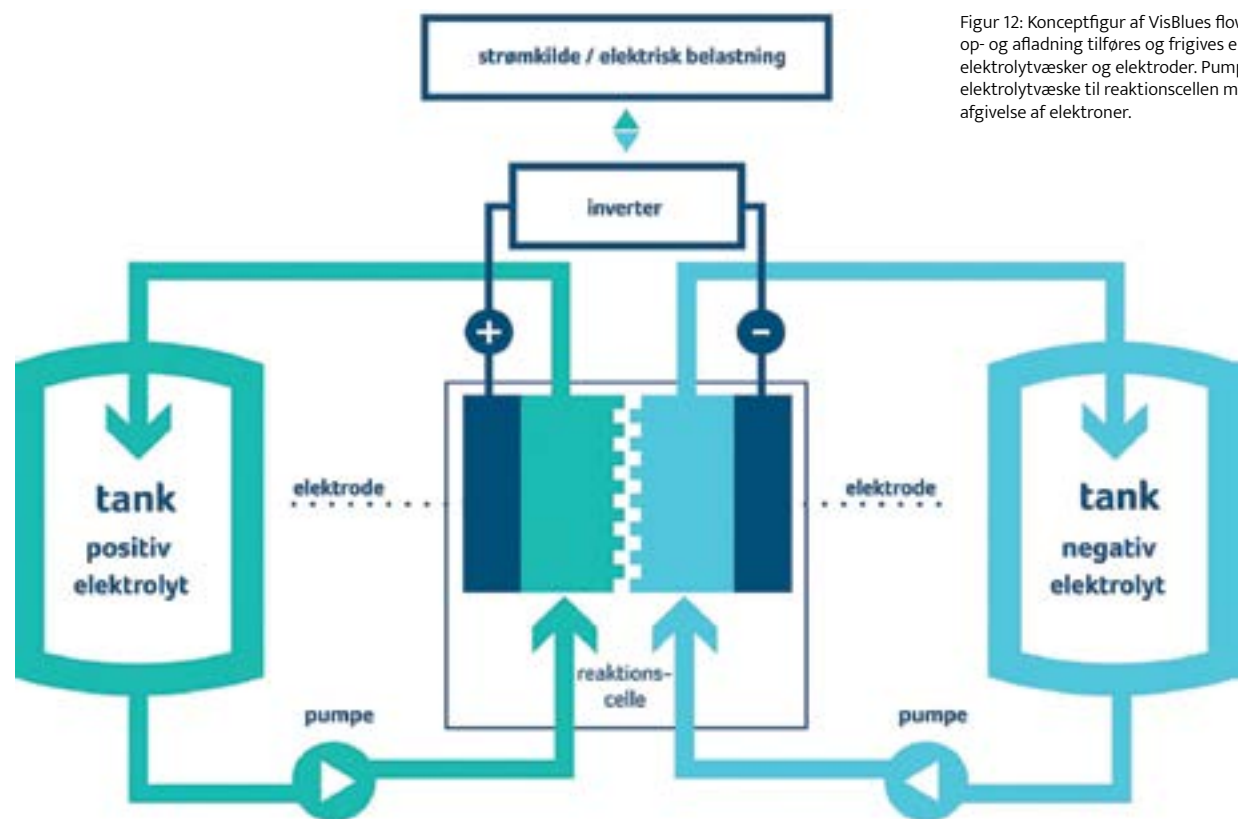
LMNO-batterier vil kunne designes til anvendelse i forskellige applikationer. Det gælder elbiler, hvor konkurrencedygtig pris og høj energitæthed er afgørende. Dertil er oplagte anvendelser færges og tog med behov for meget hurtig opladning.

Mere information:
www.topsoe.com
Søren Dahl, lead scientist, Topsoe

Case 2

VisBlue producerer bæredygtige batteriløsninger til lagring af grøn strøm

Virksomheden udspringer af et samarbejde mellem universiteterne i Aarhus og Porto i 2014 og har undervejs modtaget finansiering fra både danske og europæiske støtteprogrammer. Danske VisBlue har i dag mere end 20 ansatte og er en global partner inden for energilagrløsløsninger med over 150 installerede batterisystemer i Danmark, Portugal, Tyskland og Tjekkiet.



Figur 12: Konceptfigur af VisBlues flowbatterier. Ved op- og afladning tilføres og frigives elektroner mellem elektrolytvæsker og elektroder. Pumperne sikrer frisk elektrolytvæske til reaktionscellen mhp. effektiv lagring og afgivelse af elektroner.

UDFORDRING

Hvis vi skal sikre maksimal værdiskabelse af Danmarks massive udbygning af vind og sol, har vi brug for batterier til bl.a. kommuner, industri, boligforeninger og selvejende institutioner. Batterierne skal være bæredygtige både økonomisk og klimamæssigt.

LØSNING

VisBlue benytter den gennemprøvede vanadium redox flow-teknologi (se figur 12) til at lagre elektricitet i en vandbaseret løsning, der er kendetegnet ved dets ikke-nedbrydelige, ikke-antændelige og lav-risiko fordele. Med en genanvendelsesprocent på 99% og levetid på mere end 20 år (20.000 op- og afladninger), er VisBlues skalerbare 40 og 250 kWh flowbatterier et bæredygtigt, sikkert og langtidsholdbart alternativ til gængse batterityper på markedet.

POTENTIALE

Med VisBlues flowbatterier kan kunder effektivt lagre elproduktion fra VE-kilder som sol og vind til vindstille og overskyede dage. Løsningen er attraktiv for bl.a. kommuner, boligforeninger, selvejende institutioner og industrivirksomheder, som anvender flowbatteriløsninger til at balancere deres strømforbrug i en bæredygtig retning både økonomisk og klimamæssigt.

Mere information:
www.visblue.dk
Søren Bødker, CEO og stifter, VisBlue
Mia Voldum, chef for kommunikation og kultur, VisBlue

Case 3

XOLTA gør det muligt for virksomheder og private at optimere VE-anlæg med intelligent styring

XOLTA er en danskejet virksomhed med speciale i batterisystemer til lagring af energi. Batterierne styres af en cloudbaseret intelligent software, der optimerer brugen af batteriet både for private, virksomheder og det fælles elnet. XOLTA har installeret mere end 15 MWh batterikapacitet fordelt på mere end 1300 anlæg til både virksomheder og private, se figur 13.



Figur 13: Haarups maskinfabrik ved Silkeborg har monteret 12 XOLTA-batterier, der lagrer el fra fabrikens solceller og gør fabrikken selvforsynende med elektricitet fra marts til november [53].

UDFORDRING

Det voksende elforbrug skaber behov for, at flere virksomheder, private og boligforeninger mv. etablerer vedvarende og effektive energianlæg. For at begrænse belastningen af elnettet, er det vigtigt, at flere bliver selvforsynende med vedvarende energi.

LØSNING

Optimal brug af vedvarende energianlæg kræver, at batteriløsningen kan styre, hvornår batterier oplader og aflader med elektricitet via elnettet. Alle XOLTAs batterier kobles til et sofistikeret energistyringssystem (EMS). Systemets computerstyrede optimeringsværktøjer er cloudbaserede og er forbundet til hvert enkelt batteri. Den cloudbaserede optimeringsalgoritme holder automatisk styr på batteriets funktion, hvorved det altid yder optimalt under hensyntagen til vejrforhold, elpris og det forventede fremtidige forbrug.

POTENTIALE

XOLTA-batterier gør det muligt at optimere lagring af energi og derved udnytte egenproduceret vedvarende energi optimalt samtidig med, at batterierne kan bidrage til at holde elnettet i balance og udskyde brug af elnettet til perioder med lav belastning. Det giver en økonomisk gevinst for den enkelte virksomhed såvel som den private husejer samt reducerer belastningen af elnettet. Samtidig gør det indfasningen af fornybar energi i elnettet mere enkelt og billigere, hvilket understøtter Danmarks mål om en omkostningseffektiv og grøn omstilling.

Mere information:
www.xolta.com
Dennis Vester, markedsføringschef, XOLTA

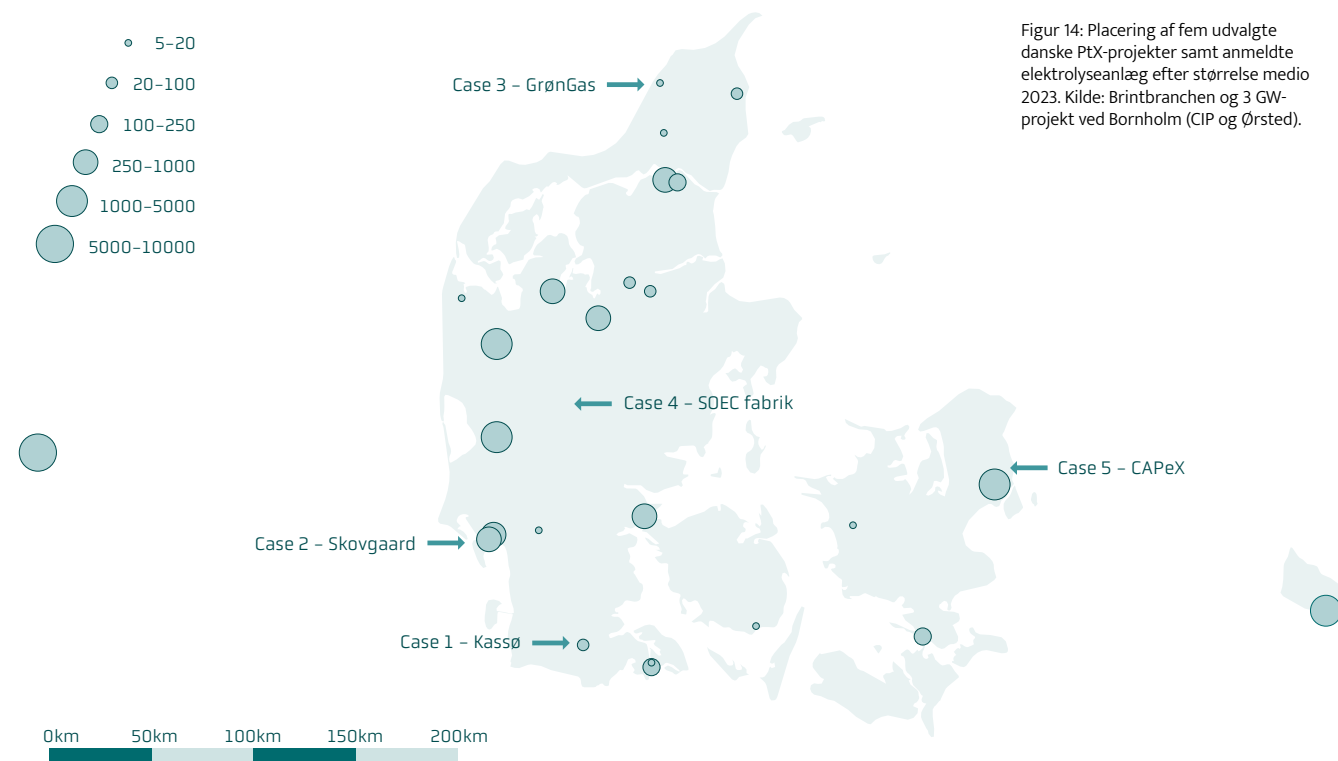


POWER-TO-X

Den danske klimalov fra 2020, Power-to-X-aftalen (2022) og en række politiske strategier og støtteprogrammer viser tydeligt, at PtX er højt på den politiske dagsorden og er tiltænkt en nøglerolle i at opnå et integreret, fleksibelt og klimaneutralt energisystem [54]. PtX inkluderer teknologier, som er karakteriseret ved at anvende vedvarende energi frem for fossil energi til fremstilling af samfundets vitale byggeklodser som brændstoffer, kemikalier, plastik med mere. Teknologierne omfatter mange processer og sektorer, området er komplekst, har mange udfordringer men også stort potentiale for klima, viden og vækst.

PtX kan bidrage til at reducere klimaaftrykket fra sektorer, hvor alternative løsninger som energieffektivisering og direkte elektrificering er teknisk og/eller økonomisk vanskelige at gennemføre eller allerede er udnyttet fuldt ud. Erhvervslivets engagement i PtX er stort som vist i figur 14 med annoncerede elektrolyseanlæg og placering af fem PtX-projekter, som bliver beskrevet i detaljer senere.

Elektrolysekapacitet i 2030 (MW el)



Den danske klimapolitik har sammen med erhvervsliv og vidensinstitutioner skabt en fælles platform med stærke kompetencer, partnerskaber og energiinfrastruktur, der gør Danmark til et oplagt udviklingssted og testnær ”sandkasse” for forskning, udvikling og afprøvning af internationalt konkurrencedygtige PtX-teknologier. Men der er stor international konkurrence om at være blandt de første og førende lande, der udvikler PtX-teknologier, opskalerer og industrialiserer for at eksportere teknologier og knowhow på området.

Det er afgørende at danske aktører hurtigt tilegner sig og deler praktiske erfaringer fra drift af PtX-anlæg i tværsektorielle partnerskaber, som udgør fundamentet for, at Danmark kan blive internationalt anerkendt leverandør af innovative PtX-løsninger. Det missionsdrevne forsknings- og innovationspartnerskab MissionGreenFuels understøtter dette formål ved at udvikle grønne brændstoffer til transport og industri i 2030 og 2050. Partnerskabet er lanceret i 2022 og samler omkring 90 aktører fra industri og forskning. Missionen er støttet af Innovationsfonden med hidtil 200 mio. kroner og yderligere medfinansiering fra de deltagende virksomheder.

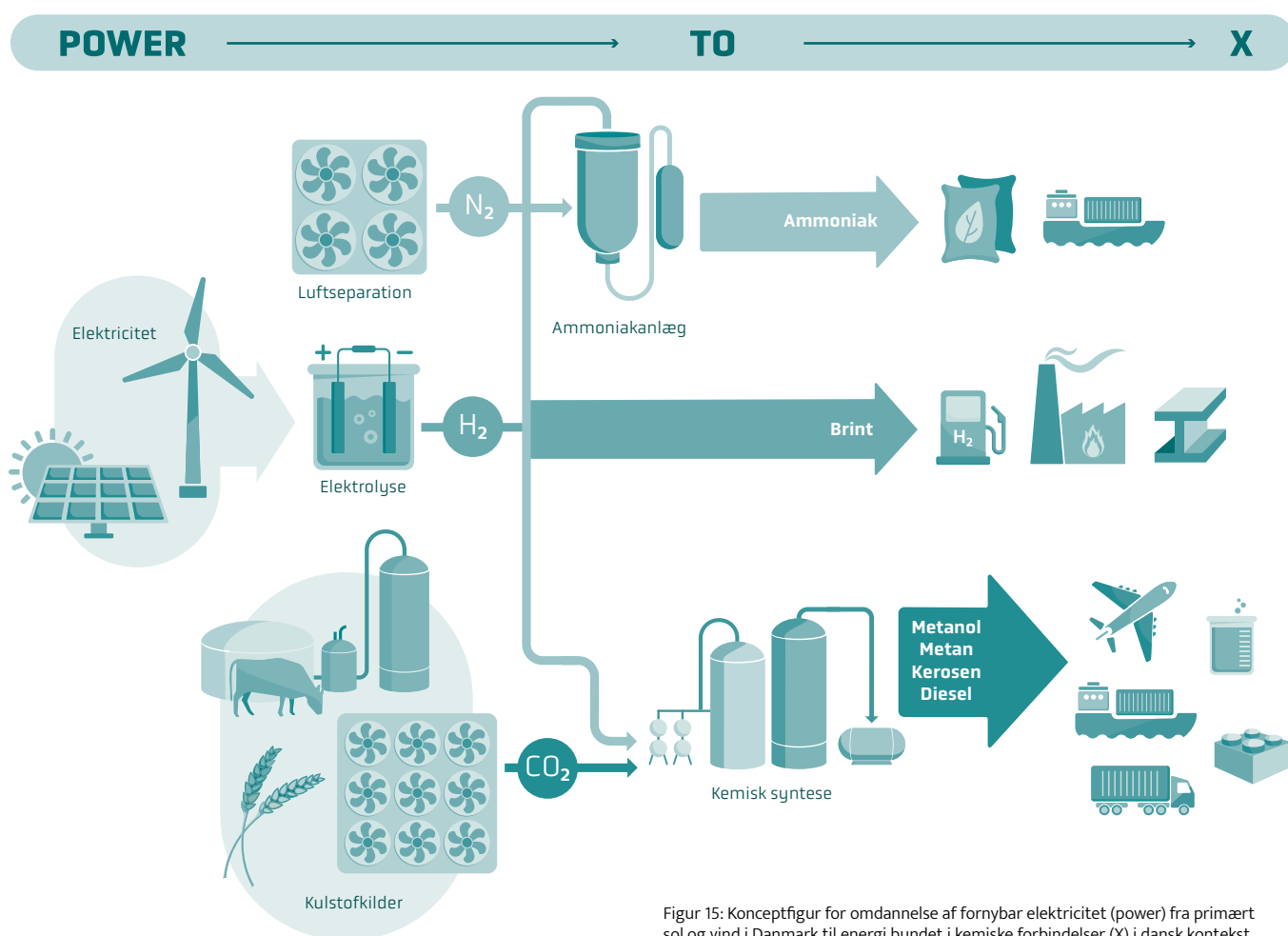
Danmarks stærke forudsætninger og samstemmende interesser gør det realistisk, at PtX kan bidrage til klimamål, sikre profitable markedsandele og generere vidensbaserede arbejdspladser, hvilket skaber samfundsmæssig værdi.

Fra fornybar elektricitet til samfundsvigtige molekyler

PtX er omdannelse af vedvarende elektricitet (power) til kemiske molekyler (X) via kemiske processer, der involverer bæredygtige råstoffer som vist i figur 15. Fornybar energi leverer elektricitet, der kan splitte vand i brint og ilt i elektrolyseanlæg. Brint er en essentiel byggekloks i produktion af kemikalier, brændstoffer, medicin m.m., hvor brint danner molekyler via reaktion med kvælstof og kulstof, som begge kan blive indfanget fra luften. Kulstof kan også komme fra biomasse eller som rest fra biomassebaserede processer som f.eks. CO₂ fra biogasproduktion, der ofte ikke bliver udnyttet. Fossilt udledt CO₂ indgår ikke, da det ikke er betegnet som bæredygtigt.

Brint kan reagere med kvælstof og/eller kulstof i konventionelle kemiske anlæg og danne henholdsvis ammoniak eller molekyler indeholdende kulstof og brint som metanol, metan, kerosin og diesel. Ammoniak er verdens næstmest producerede kemikalie og medfører udledning af store mængder CO₂ [55]. Klimabelastningen stiger pga. forventning om tredobling af produktionsmængder i 2050, medmindre produktionen af ammoniak bliver mindre klimabelastende.

Ammoniak bliver hovedsageligt brugt til kunstgødning og kan potentielt benyttes som skibsbrændstof. Skibsfart udleder få procent af verdens CO₂, men direkte elektrificering kan ikke dekarbonisere skibsfarten, som derfor kigger mod potentielt grønnere brændstoffer som ammoniak baseret på vedvarende energi. Brint kan anvendes direkte i kemiske industrier, stålværker og transportsektoren. Kulbrinter indeholder kun kulstof og brint og er råstoffer til produktion af kemikalier, brændstoffer, plastik m.m. Metanol har samme anvendelser men indeholder også ilt. Grøn metanol kan bl.a. indgå i fremstilling af flybrændstof.

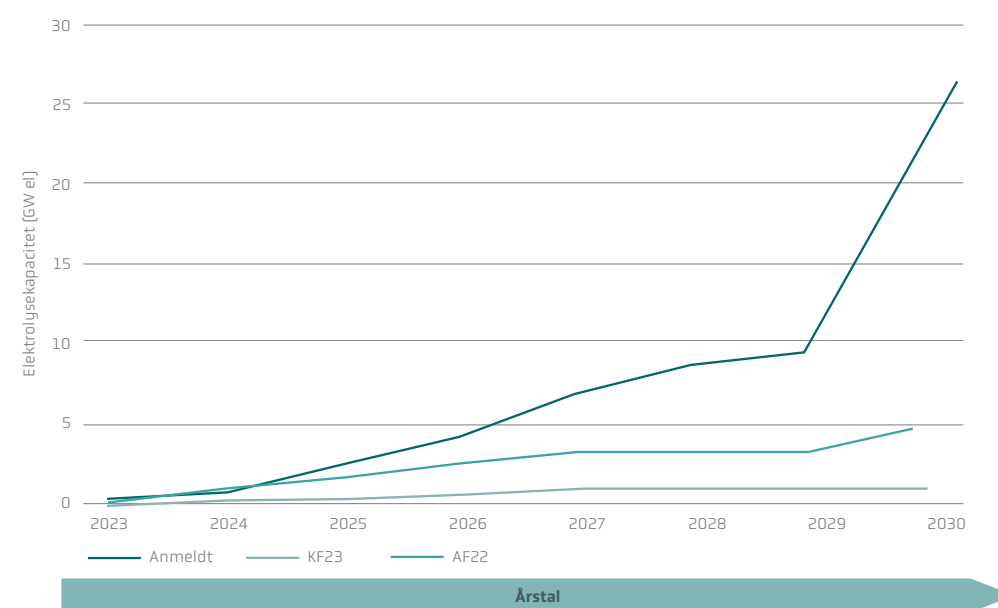


Figur 15: Konceptfigur for omdannelse af fornybar elektricitet (power) fra primært sol og vind i Danmark til energi bundet i kemiske forbindelser (X) i dansk kontekst.

Udvikling af det danske PtX-økosystem

Dansk erhvervsliv og vidensinstitutioner er klar med kapital, kompetencer, teknologier og samarbejdsvillighed inden for PtX. Erhvervslivets annoncerede elektrolysekapacitet overgår Energistyrelsens fremskrivninger som vist i figur 16.

Energistyrelsen forventer 0,9 GW elektrolysekapacitet i 2030 med gældende politiske aftaler og 4,9 GW i primo 2030 ved indfrielse af klimamål [26] [8]. Et bredt politisk flertal vedtog med PtX-strategien (2022) et mål om 4-6 GW elektrolysekapacitet i 2030 for at reducere 2,5-4,0 mio. tons CO₂ i 2030 heraf 2 mio. tons i 2030 til Danmarks klimaregnskab [62]. EU vedtog i 2020 en brintstrategi med mål om 40 GW elektrolyse i EU i 2030 [58]. Danske PtX-aktører har derimod annonceret 25 GW elektrolysekapacitet i 2030, men kun få, mindre PtX-projekter har truffet endelig investeringsbeslutning i skrivende stund. Det forventes ikke, at alle projekterne bliver til virkelighed i 2030.

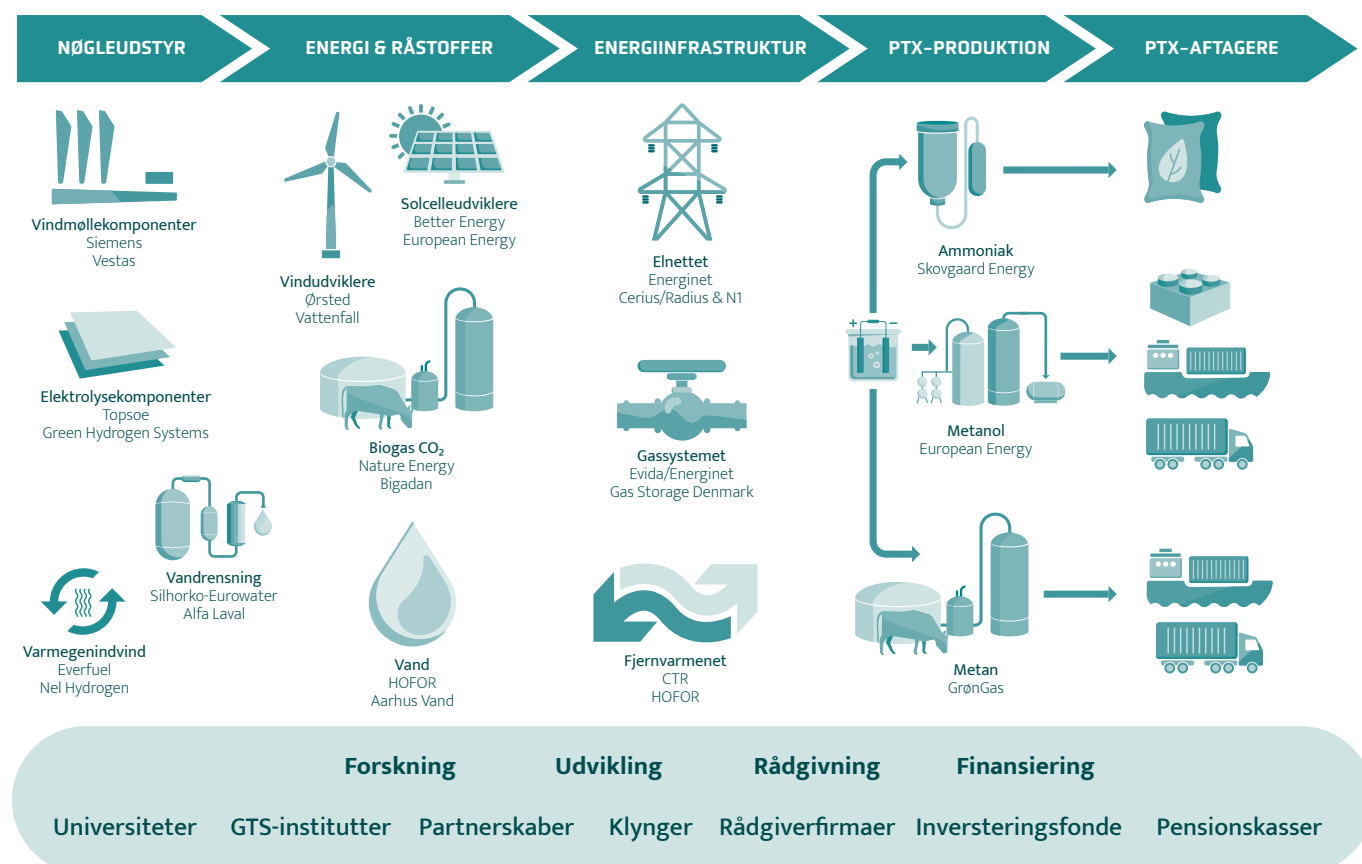


Figur 16: Fremskrivninger af elektrolysekapacitet i Danmark til 2030 jf. PtX-aktører ("anmeldt"), Energistyrelsens Klimastatus og -fremskrivning 2023 (KF23) og Energistyrelsens Analyseforudsætninger til Energinet 2022 (AF22). Opdateret juli 2023 med 3 GW projekt ved Bornholm (CIP og Ørsted) og tal fra Brintbranchen [56].

Brintforbruget er i 2023 på 0,02 og 1,7 mio. tons per år i henholdsvis Danmark og Tyskland, hvorfor Tyskland spås at blive en stor aftager af dansk brint, hvis storskala brintproduktion bliver realiseret i Danmark [59]. Biogasanlæg og nye brintforædlingsanlæg kan øge Danmarks brintforbrug, mens eksisterende og kommende store brintforbrugere i Tyskland også kan aftage danskproduceret brint. Tyskland forventer en fordobling i brintforbruget mellem 2020 og 2030, hvoraf import skal dække 50-70% af behovet [60].

Danmark har stærke kompetencer, teknisk viden og solid erfaring inden for elektrolyseteknologi, syntesekemi, energieffektivitet og digitalt integrerede energisystemer (gas, varme og el), der samtidigt har høj forsyningssikkerhed. Styrkerne er bredt repræsenteret over hele PtX-værdikæden, som vist i figur 17.

Danmark har en stærk tradition for at arbejde sammen på tværs af faglige sektorer og myndigheder, vidensinstitutioner og industri. Virksomheder har adgang til højspecialiseret og innovativ arbejdskraft, biogent CO₂ fra både biogasanlæg og biomasseforbrændingsanlæg og kan forbruge el med høj andel vedvarende elektricitet. Det betyder også, at danske virksomheder har mulighed for at efterleve EU's krav til grøn brændstofproduktion [61]. Ud fra en samlet vurdering, må Danmark siges at være et attraktivt centrum for stærk forskning og udvikling af innovative PtX-løsninger.



Figur 17: PtX-værdikæde med to centrale virksomheder inden for hver kategori. Næst fremgår aktører, der arbejder på tværs og understøtter værdikæden. Oversigten er ikke udtømmende.



Seniormanager Anne Hauch viser rundt i Topsoes state-of-the-art faciliteter, som er med til at udvikle SOEC-teknologi.

Centrale, udvalgte PtX-udfordringer

I den grønne omstilling er der brug for energieffektive og langtidsholdbare elektrolyseanlæg, som samtidig er konkurrencedygtige globalt. Forskningsprojekter kan forbedre elektrolyseteknologier og driften heraf men kun til et vist niveau. Næste skridt er virkelighedstro test og afprøvning af elektrolyseanlæg i mindre og større skala i integration med VE-anlæg, biogas og forædlingsanlæg for at gøre PtX konkurrencedygtig i forhold til fossile og øvrige alternativer. Praktiske erfaringer rejser nye spørgsmål og skaber lærerig indsigt for industrien, som sammen med forskere kan udvikle innovative og optimerede løsninger, der forbedrer ressourceudnyttelse, virkningsgrad, klimaaftryk med mere.

Modning af elektrolyseteknologier

De tre mest kendte elektrolyseteknologier er AEC (alkaline electrolysis cell), PEMEC (proton electrode membrane electrolysis cell) og SOEC (solid oxide electrolysis cell), som gennem årene er blevet teknologimodnet. Teknologierne har fortsat et stort udviklings- og optimeringspotentiale, som kan indfries gennem forsknings-, udviklings- og demonstrationsprojekter på tværs af værdikæden. Idriftsættelse af større elektrolyseanlæg og indhentning af erfaringer er centralt for at modne teknologier, hvilket inkluderer identifikation, koordinering og adressering af nødvendige indsatsområder. Indsatsområder er industrialisering, digitalisering, automatisering, fleksibel drift, kilder til vand samt integration med elnet, gassystem og fjernvarmenet.

Parallelt hermed skal forskning i nye materialer til elektrolyseceller, stakke og systemer bane vejen for mere effektive elektrolyseceller og nye PtX-teknologier baseret på højtydende, bæredygtige og lettilgængelige materialer. Højere elektrisk effektivitet af elektrolyseprocessen er central for at reducere anvendelsen af ressourcer som råstoffer, energiressourcer, arbejdskraft og landjord. Pga. ressourceknaphed er det særligt vigtigt at understøtte forskningen inden for dette felt.

Hertil kommer renhedskravet til vand, da ultrarent vand er en fundamental ressource for elektrolyseanlæg. Et anlæg på 1 GW med 50% opetid forbruger årligt 0,9 mia. liter ultrarent vand eller 1,2 mia. liter grundvand svarende til 23.000 personers årlige vandforbrug [63] [64].

Markedsmekanismer kan skabe konkurrencedygtige demonstrationsanlæg

Danske myndigheder har i en årrække tildelt udvalgte projekter status som testzoner med færre regulatoriske krav for at fremme afprøvning af innovative løsninger. Tiltagene har accelereret teknologiudvikling men kun inden for de udvalgte områder.

Uden kapital og virksomheder kommer vi ikke til at se PtX-anlæg i GW-skala, da investeringslysten er tæt koblet med, hvordan teknologierne yder i praksis. Nøglen til storskala PtX er at skabe tydelige vilkår for konkurrencedygtige demonstrationsanlæg. Det forudsætter klare, langsigtede og markedsunderstøttende rammevilkår som f.eks. skattefradrag, infrastrukturinvesteringer, gunstige afgifter og tariffer samt hurtigt assisterende og effektivt myndighedsarbejde sammen med de nødvendige godkendelser. Understøttende markedsvilkår er et nødvendigt værktøj til at accelerere teknologiudvikling af integrerede og innovative PtX-løsninger i Danmark.

Involvering af lokalsamfundet ved opførelse af nye anlæg

Lokalsamfundets accept eller mangel på samme er et vigtigt aspekt ved opførelse af store energianlæg som solcelleanlæg og vindmølleparker. Projekter risikerer at blive forsinket eller aflyst af borgergrupper, som er nervøse for lokale miljøkonsekvenser. Eksemplerne er mange både i Danmark og i vores nabolande. Involvering af borgergrupper tidligt i projektudvikling er centralt, hvilket flere danske kommuner og private organisationer i stigende grad praktiserer. Demokratiske og omkostningseffektive værktøjer er vedvarende dialog og tilstedeværelse i lokalsamfundet, etablering af civile følgegrupper eller borgersamlinger. Det kan være i form af udvikling af rekreative områder, hensyn til biodiversitet og klima samt forskellige former for medejerskab. Anvendelse af de nævnte værktøjer bidrager til lokal værdiskabelse og medfører, at borgerne i højere grad tager aktivt del i udvikling af projekterne til gavn for lokalsamfundet, projektejerne og den grønne omstilling.

Case 1

Pionercentret CAPeX accelererer udvikling og opdagelse af bæredygtige og skalerbare PtX-materialer

Pionercentret for accelereret PtX-materialeopdagelse (CAPeX) er et strategisk og transformativt forskningscenter, der arbejder med lave TRL-niveauer. Centret fokuserer på hurtig opskalering af nyudviklede materialer, opdagelser, og teknikker for at skabe værdi for samfund og klima. CAPeX er tværvideenskabeligt og transdisciplinært i sin meto-
detilgang med en 13-årig tidshorisont til 2036 baseret på støtte fra en række danske offentlige og private fonde. Centret samler førende eksperter fra fem danske universiteter (DTU, AAU, SDU, AU og KU) i samspil med tre uden-
landske universiteter og konsortier (University of Toronto og Acceleration Consortium, Utrecht University og SUNER-
GY, og SUNCAT fra Stanford University). Centret inkluderer et akademi (CAPeX Academy) målrettet yngre forskere med deltagelse af førende danske virksomheder i PtX og anden grøn teknologi.



Figur 18: Professor Tejs Vegge, DTU og professor Frede Blaabjerg, AAU, leder Pionercentret CAPeX.

UDFORDRING

En central udfordring for udrulning af elektrolyseteknologier er at opskalere teknologierne hurtigt uden at belaste verdenssamfundets råstoffer, økonomi og klima. Derfor er der brug for samarbejder på tværs af faggrupper og sektorer, der udforsker og udvikler nye absolut bæredygtige materialekombinationer og sektorkoblinger. Derved kan synergipotentialt ved komplekse og tværsektorielle PtX-løsninger blive en realitet. Centrale udfordringer er hastighed, kompleksitet og at lykkes med et åbent og tværgående samarbejde.

LØSNING

CAPeX accelererer udvikling af PtX-materialer vha. AI, computersimuleringer, eksperimenter, syntese og fabrikation samt åben og autonom deling af data og materialer både fysisk og digitalt på tværs af discipliner, faggrupper og lande under lederskab af Tejs Vegge og Frede Blaabjerg som vist i figur 18.

Forskningsprojektet vil uddanne mere end 100 Ph.d.'er og postdoc's ("Power2Xperts") med internationalt udsyn og transdisciplinære kompetencer inden for udvikling og sammensætning af materialer, der kan bidrage til omstilling af det globale energisystem ved at repræsentere nationaliteter og kompetencer fra hele verden.

POTENTIALE

Centrets ambition er at udvikle nye metoder og selvkørende laboratorier til opdagelse og fremstilling af nye, bæredygtige energimaterialer til PtX-formål. Hensigten er at forbedre effektiviteten af fremstilling af f.eks. brint, skibs- og flybrændstof med høj energitæthed, samt bæredygtige kemikalier og bio-elektrokatalytisk fremstilling af kemikalier, brændsler og proteiner.

Ambitionen er at opdage nye materialer op til ti gange hurtigere end i dag og hermed accelerere transformationen af energisystemet mod CO₂-neutralitet ved brug af bæredygtige materialer.

Mere information:
<https://capex.dtu.dk>
Tejs Vegge, professor, DTU Energi
Frede Blaabjerg, professor, AAU Energi

Case 2

Topsoes udvikling af elektrolyseceller til højeffektiv SOEC-elektrolyse

Topsoe har 30 års erfaring i udvikling af solid oxide cells (SOC), som har været fokuseret på elektrolyseanvendelse dvs. som SOEC siden 2014. Udviklingen af SOEC bygger på projekt samarbejder på tværs af danske vidensinstitutioner og industripartnere og har været helt afgørende for at accelerere udvikling og kommerialisering af teknologien. Topsoe har internt og gennem samarbejder fået adgang til banebrydende forskning, kompetencer og metoder, som promoverer teknologiudvikling, innovation og reducerer virksomhedens investeringsrisiko på vej til marked.



Figur 19: Visualisering af Topsoes SOEC-produktionsfabrik, der er designet til årligt at producere SOEC svarende til 500 MW elektrolyse fra forventeligt 2025 med muligheder for at udvide til 5 GW.

UDFORDRING

Mere teknologimodne PEMEC og AEC har lavere virkningsgrad end SOEC og har derfor et øget behov for vedvarende energi for at kunne producere den samme mængde brændstof f.eks. brint [65]. Højere driftstemperatur åbner for at anvende varme fremfor mere kostbar elektricitet til at drive splitning af vand til brint, men da PEMEC og AEC i dag typisk opererer under 100°C kan de kun i begrænset omfang udnytte industriel overskudsvarme til at øge virkningsgraden. SOEC består af lettilgængelige, genanvendelige og omkostningseffektive keramiske materialer uden brug af ædle metaller som f.eks. platin. Resultatet er lavere forsyningsrisiko og mere cirkulære materialer i forhold til materialer anvendt ved PEMEC og AEC. SOEC har høj driftstemperatur over 700°C, som medfører højere virkningsgrad, der kan stige yderligere ved udnyttelse af varme fra f.eks. industrier.

LØSNING

Topsoe forventer at levere danskproducerede SOEC og tilhørende SOEC-stakke i 2025 fra fabrikken i Herning, der er visualiseret i figur 19 og efter planen er færdig i 2024. De første 5 GW SOEC-celler er allerede reserveret af den amerikanske samarbejdspartner og ammoniakudvikleren First Ammonia [66].

Den fuldt automatiserede fabrik er Topsoes største enkeltstående investering og udgør et par milliarder kroner. Her vil Topsoe producere keramiskbaserede elektrolyseceller, som virksomheden på nuværende tidspunkt producerer i mindre mængder i Lyngby. Fabrikken producerer og samler stakke af 100 elektrolyseceller. Samling af 12 stakke udgør et modul, som indgår i opbygning af egentlige SOEC-systemer til PtX-anlæg [67].

POTENTIALE

SOEC har potentiale til at blive drevet fleksibelt, hvilket er essentielt i en fremtid med varierende vedvarende elproduktion og elpriser.

SOEC kan i højere grad end AEC og PEMC fleksibelt køre op og ned i belastning, dvs. varierende brint (H₂) produktionsrate. Flexibiliteten gør, at integrerede anlæg med både brintproduktion og -forbrug f.eks. til ammoniak kan blive højeffektive. SOEC er dermed velegnet til at producere ammoniak i samspil med store, fjernliggende energiproducerende anlæg med variabel produktion som havvindmøller og solceller, hvor råstofferne kvælstof og vand er lettilgængelige. Topsoe tester desuden også tryksatte SOEC-stakke for at reducere antallet af omkostningstunge kompressionstrin, da ammoniak bliver komprimeret for at øge energitætheden.

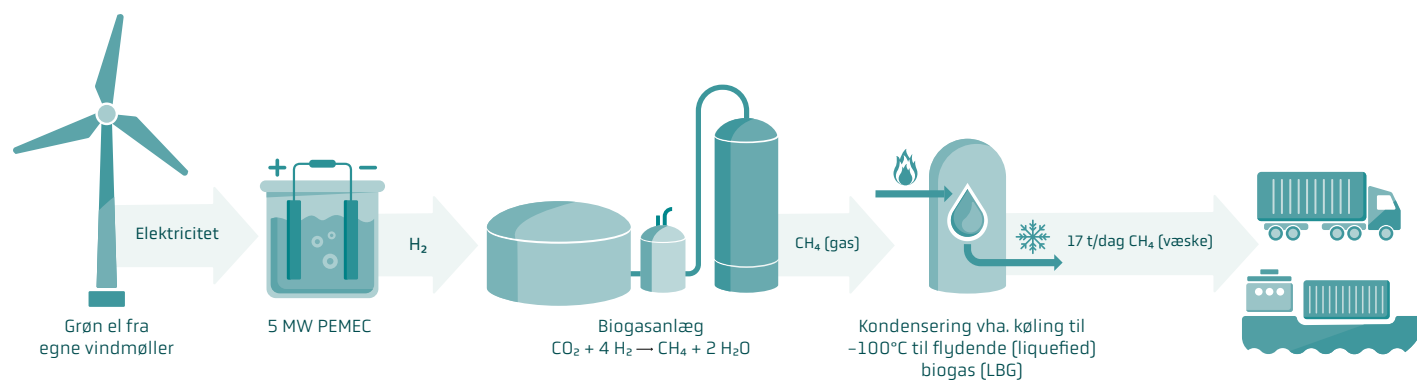
SOEC-teknologien er unik ift. AEC og PEMEC, idet SOEC også kan elektrolysere en blanding af vand-damp og CO₂ samtidig (co-elektrolyse) til syntesegas (kulmonoxid og brint dvs. CO- og H₂-blanding). Syntesegas er en værdifuld gasblanding, der udgør essentielle byggeklodser for den kemiske industri. Realisering af konkurrencedygtige SOEC kræver opskaleret og reproducerbar produktion af højtydende celler, stakke og moduler. Vejen dertil går via test i storskala med fokus på mekanisk stabilitet af celler og stakke, undersøgelser af materialeholdbarhed over tusindvis af timer og udvikling af effektive sektorintegrationsløsninger.

Mere information:
<https://www.topsoe.com/processes/green-hydrogen>
Anne Hauch, seniormanager, Topsoe

Case 3

Brint fra selvforsynende energi på land gør vejtransport og skibsfart grønnere

GrønGas Hjørring blev etableret i 2001 og har hidtil været et biogasanlæg med elproduktion. Nu er der investeret i et nyt anlæg, der renser og køler produceret biometan for at gøre den flydende og dermed øge energitætheden. Figur 20 viser Hjørring-anlægget. Ejerskabet er delt mellem Jens Peter Lunden og E.ON. Anlægget behandler ca. 100.000 tons biomasse årligt og producerer ca. 5 mio. Nm³ biometan. GrønGas Hjørring er en del af Nordjyllands Erhvervs-fyrtårn kaldet CO₂-vision og har herved fået støtte fra REACT-EU til CO₂-fangst.



Figur 21: Konceptfigur af GrønGas projektet. Egenproduceret elektricitet driver elektrolyseanlæg, som forsyner biogasanlæg med brint. Brint og CO₂ danner biometan (CH₄), som bliver kondenseret til LBG, der pt. er tiltænkt skibsfart og tung vejtransport.

UDFORDRING

Biogas indeholder cirka 40% CO₂ og 60% (bio) metan, men CO₂ bliver ofte ikke udnyttet pga. fravær af markeder og teknologier for at anvende CO₂ fra biogas. Danske afgiftsstrukturer begrænser anvendelsen af grønne alternativer til fossile brændstoffer. Det omvendte er tilfældet i Tyskland. Konsekvensen kan være en forsinkelse af transportsektorens grønne omstilling i Danmark.

Dertil betyder elektrificering af samfundet en stor stigning i elforbruget og dermed belastning af elnettet, hvilket forbrug af egenproduceret elektricitet kan mitigere, men her står lovgivning ofte i vejen for anvendelser bag elmåleren.



Figur 20: Billede af GrønGas' anlæg ved Hjørring.

LØSNING

Brint kan reagere med CO₂ og danne biometan igennem en proces kaldet metanisering, som øger mængden af biometan produceret fra biogasanlægget. Projektets anvendte metaniserings-teknologi beror på udviklingssamarbejder med vidensinstitutionerne i Foulum Forsøgscenter, der har givet grobund for at afprøve teknologien i større skala.

GrønGas har en vision om at lave en energiløsning bestående af egne vindmøller, biogasanlæg, PEM-elektrolyse og rense- og kølefaciliteter. Elektrolyseanlægget forbruger elektricitet fra egne vindmøller og leverer brint til biogasanlægget, hvor metanisering finder sted som vist i figur 21. Biometanen bliver renset og nedkølet til flydende biometan (LBG), som er et grønt alternativt brændstof til diesellastbiler og skibe. Afsætning sker til Tyskland pga. gunstige afgiftsstrukturer og et veletableret marked for grønne dieselalternativer. Dialog med myndigheder og en revision af elforsyningsloven har adresseret nogle regulatoriske barrierer, men tilbageværende barrierer begrænser fortsat mulighederne for at integrere energiprojekter og driftsoptimere egen ressourcenuyttelse.

POTENTIALE

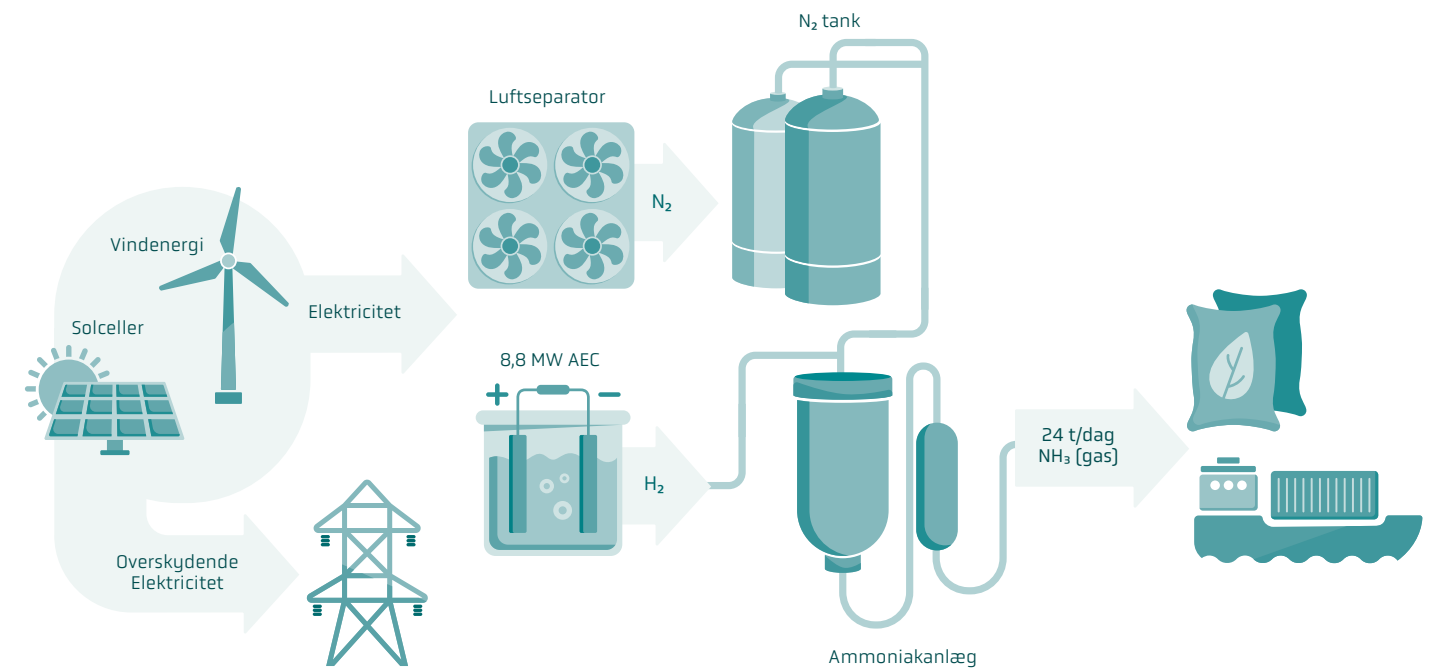
Projektet integrerer og udnytter flere grønne energikilder lokalt og optimalt uden tilslutning til elnettet. Erfaringerne fra projektet kan kickstarte effektiv lokal udnyttelse af CO₂ i biogasanlæg, da det fjerner transportomkostning til CO₂, fortrænger klimabelastende fossil gas med biometan og forbedrer Danmarks selvforsyningsgrad af gas.

Mere information:
<https://www.grongas.dk>
Allan K. Olesen, CEO, GrønGas

Case 4

Dynamisk produktion af ammoniak reducerer belastning af elnet og klimaaftryk fra skibsfart og landbrug

Skovgaard Invest blev etableret i 1999 af Jørgen Skovgaard og skiftede i 2021 navn til Skovgaard Energy, hvor porteføljen blev udvidet fra vindmølleprojekter til sol, PtX, biogas m.m. Firmaet har 19 ansatte i Lemvig. Skovgaard fik sammen med Topsoe og Vestas EUDP-midler i 2021 til et fire årigt Renewable Dynamic and Distributed Ammonia Plant (REDDAP) projekt. Lokale virksomheder deltager i høj grad i samarbejdet for at nå i mål med færrest anvendte ressourcer.



Figur 22: Diagram over REDDAP-projektet. Vedvarende elektricitet fra egne VE-anlæg driver brint- og kvælstofproduktion, som i ammoniakanlægget bliver omdannet til ammoniak (NH₃). Overskydende elektricitet bliver solgt til elnettet.

UDFORDRING

Vand, ilt og elektricitet er de lettilgængelige ingredienser til ammoniakproduktion, som derfor kan ske på mindre, decentrale anlæg, omend større opskalerede anlæg giver stordriftsfordele som lavere produktionspris og logistik. Dynamisk drift er nødvendig for optimal udnyttelse af varierende elproduktion fra vind og sol.

Udfordringen er at teste det integrerede, komplekse samspil mellem velkendte teknologier som vejrdrevne vind- og solanlæg, kommercielt AEC-anlæg og ammoniakproduktion i et virkelighedstro miljø i kommerciel skala.

Tidligere lovgivning krævede, at distribution af egen elproduktion og -forbrug skulle ske inden for matriklen. Det begrænsede kraftigt deltagerkredsen af projekter og reducerede synergien mellem aktører som f.eks. ejere af VE-, elektrolyse-, fjernvarme- og opgraderingsanlæg m.m. Ny lovgivning gør til dels op med denne problemstilling.

LØSNING

Planen er, at REDDAP-projektet starter drift i første kvartal af 2024. Projektet inkluderer egne vindmøller og solceller, som forsyner et Topsoe designet ammoniakanlæg med elektricitet som vist i figur 22. Brint og indfanget kvælstof reagerer i ammoniakanlægget, der er tryksat til 150 bar.

Den årlige ammoniakproduktion på 5.000 ton bliver lagret eller afsat til fremstilling af kunstgødning og skibsbrændstof [68]. Projektet integrerer velkendte komponenter innovativt for at opnå synergieffekter og udvikle sektorintegrationsløsninger.

Desuden er tilladelser indhentet rettidigt i forhold til teknisk udvikling af projektet, da projektpartnerne har haft en konstruktiv, tidlig og åben dialog med statslige og kommunale myndigheder.

POTENTIALE

REDDAP kan give erfaringer med dynamisk og distribueret ammoniakproduktion, som er meget eftertragtet globalt set. Distribueret ammoniakproduktion kan reducere omkostninger og klimaaftryk forbundet med produktion og distribution af centralt produceret ammoniak i dag.

Anvendelserne inkluderer grøn kunstgødning, skibsbrændstof og elproduktion i gasmotorer, gasturbiner og brændselsceller. Klimapotentialet er stort og kan gavne driftsøkonomien af elektrolyseanlæg og VE-anlæg samt samfundsøkonomien i form af større forsyningsikkerhed og reducere elnetudbygning.

Mere information:
www.skovgaardenergy.dk
Pat A Han, teknisk direktør, Skovgaard Energy

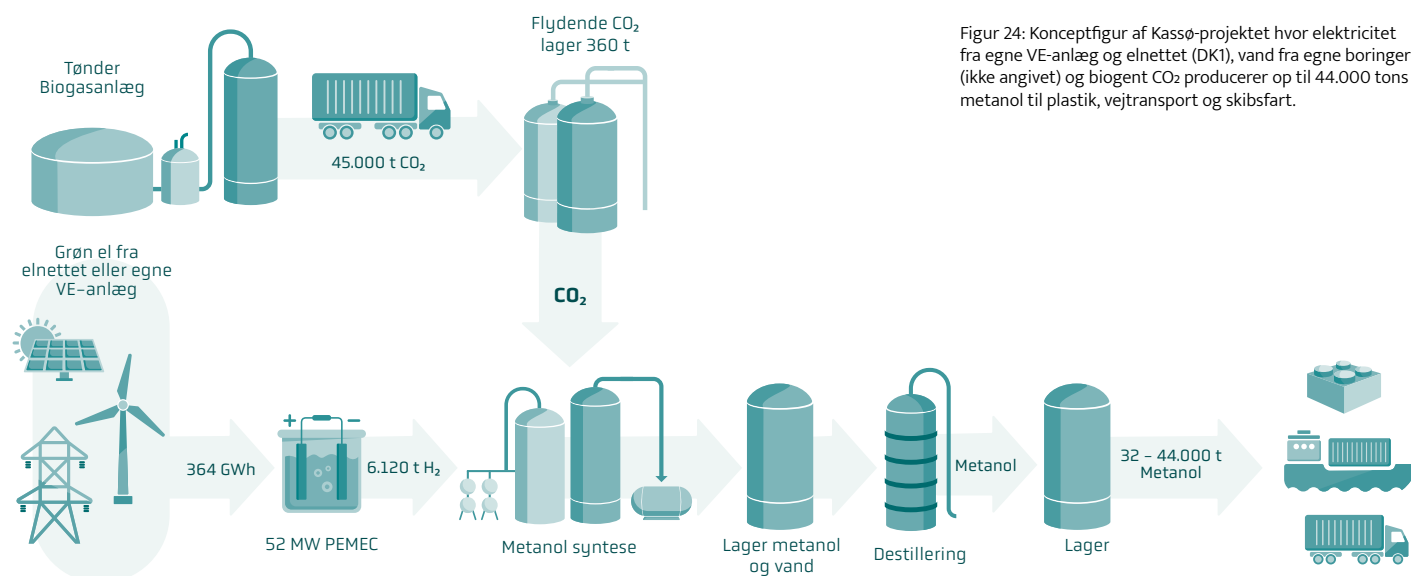
Case 5

Verdens største e-metanolanlæg gør legetøj, medicin og brændstof grønnere

European Energy blev grundlagt i 2004 og har grønne sol-, vind- og PtX-projekter i 29 lande. Virksomheden har mere end 600 medarbejdere. Kassø-projektet er vist i figur 23 og bliver verdens første kommercielle e-metanolanlæg med forventet driftsstart i 2024. Projektet involverer Nordeuropas største solcellepark på 340 MW, som European Energy ejer. Kassø-projektet har delt ejerskab (51/49) mellem henholdsvis European Energy og Mitsui.



Figur 23:
Visualisering af færdiggjort e-metanolanlæg ved Kassø i forgrunden og solcellepark i baggrunden.



Figur 24: Konceptfigur af Kassø-projektet hvor elektricitet fra egne VE-anlæg og elnettet (DK1), vand fra egne borer (ikke angivet) og biogent CO₂ producerer op til 44.000 tons metanol til plastik, vejtransport og skibsfart.

UDFORDRING

Fossil metanol er blandt verdens mest producerede kemikalier med omkring 100 mio. tons per år, men metanolproduktionen er klimabelastende, og dets anvendelser inden for plastindustrien samt tung transport til vand og lands er svære at elektrificere.

Konkrete udfordringer i Kassø-projektet inkluderer forsyning og håndtering af vand ifm. elektrolyseanlægget, tilslutning til elnettet og godkendelser fra flere myndigheder uden erfaring med lignende projekter. Dertil er PtX-markedet umodent, hvilket kalder på opbygning af værdikæder og ny lovgivning.

LØSNING

Kassø-projektet omdanner elektricitet, CO₂ og vand via PEM-elektrolyse og opgraderingsanlæg til e-metanol som vist i figur 24. Halvdelen af elektriciteten kommer fra egen solcellepark og halvdelen fra elnettet, mens 90.000 m³ vand fra egne borer og 45.000 tons biogent CO₂ fra Tønder biogasanlæg udgør de årlige resterende råstoffer til PtX-anlægget. Elektrolyseanlægget kan med en kapacitet på 52 MW og op til 7.000 årlige driftstimer producere op til 44.000 ton e-metanol afhængig af elpris, egenproduktion af tilkoblede VE-anlæg og andre driftsforhold. Metanolen bliver afsat til Mærsk (skibsbrændstof), LEGO (plastik), Novo Nordisk (plastik) og Circle K (brændstof til vejtransport).

POTENTIALE

Metanolanlægget er verdens første e-metanolanlæg og involverer mange integrerede processer, som driftserfaringer kan være med til at optimere. Projektet er unikt, idet det sker på kommercielle vilkår uden offentlig støtte, hvilket er en afgørende faktor for at udrulle løsningen på global skala. E-metanol kan direkte erstatte fossil metanol og bidrage til en klimaneutral transportsektor og kemiindustri.

Mere information:
www.europeanenergy.com
Lotte Lindeloff, direktør for PtX-udvikling, European Energy
Martin Sloth Jensen, projektkoordinator, European Energy





SYSTEMINTEGRATION KAN GØRE ENERGISYSTEMET STABILT, RENTABELT OG GRØNT

Danmark har historisk været forsynet med energi fra olie- og gasproduktion fra Nordsøen og store, centrale kraft-varmeværker, som har forbrugt indenlandske og udenlandske energikilder. Danske olieraffinaderier har produceret flydende brændstoffer. I fremtiden bliver energiforsyningen mere decentral i et klimaneutralt energisystem pga. centrale vedvarende energikilder fra især vind, sol og biomasse. Det medfører mere varierende energiforsyning, men også nye muligheder og udfordringer for energisystemet. Geotermi er en grøn, stabil varmekilde med lavt pladsbehov som formodentlig også udgør en betydelig rolle i fremtidens energisystem [69].

PtX-anlæg, datacentre, varmepumper og energilagre repræsenterer nye teknologier, der dels forbruger men også kan bidrage til lagring og konvertering af store energimængder. Fremtidens energisystem bliver mere komplekst, hvor opgaven består i at integrere ellers traditionelt siloopdelte sektorer for at skabe nye synergier til gavn for hele samfundet. Intelligent og automatiseret systemintegration kan indfri synergipotentialer, der understøtter økonomi, forbedrer ressourceudnyttelse og accelererer den grønne omstilling. Det kræver en dedikeret, langsigtet og koordineret indsats fra alle aktører i energisystemet samt beslutningstagere, investorer samt private og offentlige fonde. Indsatsen skal ligeledes være grænseoverskridende, da Danmark er tæt forbundet med Europa, når det gælder handel og udveksling af elektricitet og gas.

Kapitlet her udfolder begrebet systemintegration, som bliver sat i en dansk kontekst med beskrivelse af eksisterende systemintegrationsløsninger på forskellige niveauer fra det borgernære til det paneuropæiske. Danske kernekompetencer inden for systemintegration bliver fremlagt med reference til tidligere beskrevne cases i afsnittene om termisk, batterier og PtX.

Hvad betyder systemintegration?

Sektorintegration vedrører el, varme, transport og industri, men det kan også involvere andre forsyningsområder som vand, spildevand og affald. Systemintegration kan binde sektorer og deres energiinfrastruktur sammen på en samfundsøkonomisk optimal måde. Danmark er internationalt kendt for at integrere elektricitet og varme i kraftvarmeværker samt identificere og udvikle løsninger på tværs af sektorer og fagligheder. For den samlede danske energisektor har det allerede resulteret i udrulning af omkostningseffektive løsninger, som dog fortsat rummer et udviklingspotentiale. Centrale værktøjer til at optimere løsninger er digitalisering og forudsigelse af energibehov og -produktion. Systemintegration står helt centralt i opbygningen af fremtidens energisystem. Samspeilet kan ske på flere niveauer herunder transnationalt, nationalt, industri og borger, hvor niveauet påvirker potentialer og anvendelser.

Transnationalt forsyningsniveau

Danmarks elnet og gassystem er tæt integreret med vores nabolande. Integrationen gør det muligt at transportere og udveksle energi frit og effektivt over landegrænser, hvilket forbedrer udnyttelsen af vedvarende energikilder, udjævner prisforskelle mellem landene og højner forsyningssikkerheden i Europa. Energihandel handler ikke kun om klima, økonomi og forsyningssikkerhed men også om sikkerhed- og udenrigspolitik, hvorfor transnationale energisamarbejder bør være en politisk topprioritet. National silotænkning udgør en væsentlig barriere for at samle kræfterne og udvikle konkurrencedygtige løsninger til fælles gavn for klima, økonomi og sikkerhed.

Nationalt forsyningsniveau

Kraftvarmeanlæg demonstrerer omkostningseffektiv samproduktion af elektricitet og varme, hvor Danmark nyder international anerkendelse. Teknologien har sikret danske forbrugere lave, stabile el- og varmepriser. Fremtidens vedvarende energiproduktion vil betyde, at kraftværkerne skal bruges i færre timer af året, men det er afgørende fortsat at anvende og nyttiggøre overskudsvarmen ved elproduktion i de færre driftstimer. Varmepumper og elkedler har allerede vundet stigende indpas i fjernvarmesektoren med nye muligheder for fleksibel og mere grøn varmeproduktion i samspil med varmelagre, se afsnittet om termisk energilagring; *Case 2 Fleksibelt og innovativt damvarmelager giver billigere og grønnere varme til fjernvarmekunder.*

Landbruget udgør et andet centralt område, hvor restprodukter omdannes til gas i biogasanlæg, der forsyner danske gaskunder med grøn gas. Biogasanlæg har potentiale til at blive integreret med PtX-anlæg og derved nyttiggøre ellers bortledt CO₂ til grønne brændsler, se afsnittet om *Case 5 - Verdens største e-metanolanlæg gør legetøj, medicin og brændstof grønnere eller metan via metanisering*, se afsnittet om PtX *Case 3 – Brint fra selvforsynende energi på land gør vejtransport og skibsfart grønnere.*



Industrielt niveau

Virksomheder i byggeri-, anlæg- og fremstillingssektorer afbrænder gas for at drive varmekrævende processer ved høj temperatur men overskudsvarmen bliver i overvejende grad ikke nyttiggjort, se afsnittet om termisk energilagring Case 3 – *Heliac leverer kosteffektiv, CO₂-fri og fleksibel lagring af vedvarende og overskydende varme i stenlager.*

Industrier kan nyttiggøre deres overskudsvarme ved at etablere integrerede løsninger, der lagrer og senere recirkulerer varmen som procesvarme til intern brug. En anden mulighed er at afsætte varmen i fjernvarmenettet eller til andet nærtliggende varmebehov.

Der eksisterer få teknologier, der kan levere grøn højtemperaturvarme, men der er udvikling på området inden for højtemperaturvarmepumper (Teknologisk Institut m.fl.) og koncentreret solkraft (Heliac, Aalborg CSP, m.fl.), som har potentiale til at levere grøn højtemperatur varme til industrien.

PtX-anlæg genererer varme, som kan opretholde driftstemperaturen i anlægget eller blive lagret for at dække senere behov eller afsat i fjernvarmenettet. Resultatet er ressourceoptimering og mulighed for at få indtjening fra flere steder end kun brintproduktion.

Borgerniveau

VE-fællesskaber kan bestå af borgere, foreninger, SMV'er, kommuner, myndigheder m.fl. men ikke eldistributionsvirksomheder og beskæftige sig med forbrug, produktion, lagring og levering af energi også via det kollektive elnet [70]. Fællesskaberne danner basis for at realisere lokale synergier mellem ellers enkeltstående juridiske aktører, som ikke selv kan løfte den økonomiske byrde forbundet med vedvarende energianlæg og -systemer. Fællesejede energisystemer forsynet med lokale vedvarende energianlæg kan erstatte fossilbaseret energiforsyning hos aktører i fjerntliggende egne som f.eks. sommerhusområder og understøtte elektrificering af samfundet.

Danmark har i mange år haft lokal drift og ejerskab af fjernvarmeselskaber forankret dybt i lokalsamfundet. Netop denne form og tilgang bør fortsat understøttes via lokalt ejerskab og tillid gennem understøttende og fornuftig regulering, som vi foreslår i anbefaling 2.3 om batterier. For eksempel kan elbiler med digitale værktøjer fleksibelt oplade fra elnettet og derved bidrage til balancering af elforbrug og -forsyning.

Realisering af synergipotentialer ved systemintegration

Elnet uden forbindelse til det kollektive elnet opererer i ø-drift, se afsnittet PtX Case 3, hvilket generelt er mindre effektivt end sammenkoblede og transnationale elnet, der udveksler elektricitet og optimerer produktion, forbrug, lagring og transmission af elektricitet. Siloopdelte energisektorer bør erstattes af koblede energisektorer, som baner vejen for fleksibilitet leveret af forskellige forbrugsenheder og -typer. Det gør systemet i stand til at håndtere øgede mængder fluktuerende energiproduktion. Håndteringen af mismatch mellem energiproduktion og -forbrug kan indebære konvertering af energi f.eks. el til varme eller grønne brændsler.

Forskellige typer energilagre kan fremme kobling og konvertering, hvorfor energilagre bør fremmes med øje for deres værdi i et systemperspektiv og ud fra et samlet samfundsperspektiv. Realisering kan ske ved:

1. Samplacering af energiproduktion og -forbrug.
 - a. Energilagre kan fremme samplacering, der kan reducere transportomkostninger og øge mulighed for lokal udnyttelse af egenproduceret energi, som ellers ville være uudnyttet eller kræve dyr infrastruktur at transportere. Eksempler herpå er afsnittene termisk energilagring Case 3 og PtX Case 3.
2. Energieffektivisering.
 - a. Eksempler inkluderer el fremfor fossile brændstoffer til transportformål og varmepumper som erstatning for olie- og gasfyr til opvarmning af husstande. Energilagre kan gøre energieffektive løsninger mere rentable.
3. Restvarme og elektrificering
 - a. Energilagring bør indtænkes på tværs af sektorer for at optimere udnyttelsen af restvarme og understøtte direkte elektrificering.

Analysen af førende danske forskere viser, hvordan ellers uudnyttede energistrømme som overskudsvarme, overskydende elektricitet med mere kan finde anvendelse via energikonvertering og -lagring [71] [72] [73]. Sådanne helhedsorienterede analyser er altafgørende for at indfri en omkostningseffektiv, forsyningssikker og klimaneutral energisektor.

Der er brug for forskning- og udviklingsstøtte til styring, modellering og integration af energisystemer, hvor energilagre og fleksible energiforbrugere spiller centrale roller. Optimerede systemløsninger forudsætter også udvikling af komponenter i energiinfrastrukturen og digitale værktøjer til at forudsige energiforbrug, -produktion og -lagring med henblik på at agere på basis heraf.

I de kommende år skal vi lære af eksisterende og nye demonstrationsanlæg inden for forskellige teknologiområder som beskrevet i førmtalte cases. Vi skal anerkende, at realisering af nye markedsdesign også indebærer fejl. Demonstration af løsninger er en forudsætning for senere kommerialisering og kræver simple, transparente rammebetingelser, som fremmer hensigtsmæssig integration af energimarkeder på alle niveauer. Hertil kan Energistyrelsens objektive teknologikatalog over energilagringssystemer blive anvendt af investorer og industriere til at sammenligne lagerløsninger og derved være med til at sætte hastigheden op på udviklingen af centrale systemløsninger.

Systemforståelse viser vejen mod et klimaneutralt energisystem

Sektorintegration er afgørende for at realisere en omkostningseffektiv og ressourceoptimerende grøn omstilling [74]. Realiseringen kræver forskning, udvikling og demonstration af innovative og digitale systemløsninger på tværs af sektorer, teknologier og niveauer understøttet af energimodeller og infrastrukturkomponenter. Yderligere er der behov for at fremme investeringslysten i energilagre ved at fastlægge klare afgiftsstrukturer og rammevilkår for energilagre. Danske kraftværker har en kapacitet på 4-5 GW med produktion i 30-40% af årets timer [26]. Kapaciteten skal eventuelt i samspil med store energilagre sikre backup i fremtidens grønne energisystem, men antallet af driftstimer kan halveres gennem elektrificering og massiv udbygning af vind og sol [75].

Løsningerne kan dog ikke alene indfri synergipotentialerne men skal være en del af en strategisk energiplanlægning, som angiver hensigtsmæssige områder til fleksibelt og ufleksibelt energiforbrug, VE-anlæg, PtX-anlæg, datacentre med mere. Samtidig skaber systemintegration afhængigheder mellem sektorer, som energilagre, fleksibel drift og energiinfrastruktur kan afhjælpe og udnytte.

Nedenfor fremgår tre værktøjer, som er essentielle for at opnå et klimaneutralt samfund. Dog er flere værktøjer nødvendige, og listen er derfor ikke udtømmende.

- 1) Nye forbrug (elbiler, PtX, store varmepumper mv.) skal være fleksible således, at de kan øge mængden og udnyttelsen af vedvarende energikilder
- 2) Etabler og udnyt energilagring fleksibelt og på tværs af sektorer ved at dimensionere lagrene til at lagre energiproduktion til identificeret slutforbrug
- 3) Mere vedvarende energi og fleksibelt elforbrug betyder færre driftstimer af kraftværker gående mod 10-25% af årets timer afhængig af vejret men med omkring 5 GW kapacitet som i dag. Kraftværkerne skal være fleksible og hurtigt kunne starte og stoppe energiproduktionen

Behov for energilagring i et klimaneutralt energisystem

Energilagring understøtter et fleksibelt energisystem i forskellige sektorer, som vist herunder.

- Varmelagring og -konvertering under 100°C er kommercielle løsninger, som bidrager markant til at levere fjernvarme. Smeltet natriumsalt er også på markedet og kan lagre varme ved høj temperatur, mens varme sten (se afsnittet termisk energilagring Case 3) og hydroxidsalt er under udvikling, se afsnittet termisk energilagring Case 4 – *Hyme lagrer VE-el i smeltet salt til elforsyning og industriel procesvarme*. Løsninger med energilagring ved endnu højere temperaturer kræver stadig mere teknologiudvikling.
- Kemisk lagring er omkostningseffektiv i stor skala, hvilket Danmarks to gaslagre i Lille Torup og Stenlille demonstrerer. Fremover vil kemisk lagring også kunne inkludere grønne brændstoffer som
 - o e-metanol, se afsnittet om PtX Case 5
 - o e-ammoniak, se afsnittet om PtX Case 4 – *Dynamisk produktion af ammoniak reducerer belastning af elnet og klimaaftryk fra skibsfart og landbrug*
 - o e-kerosin fremkommet ved elektrolyse og kemisk syntese
- Ellagring i form af batterier er for omkostningstungt og ressourceforbrugende til udrulning i stor skala med henblik på energilagring. Batterier kan derimod løse lokale flaskehalse og håndtere kortvarige ubalancer i elnettet. Batterierne indgår allerede i stigende omfang i transportsektoren, hvor mange lagrer el i perioder med lave elpriser for at forbruge senere ved mobilitetsbehov, se mere i afsnittet om batterier.





FAGLIG OG AKADEMISK UDDANNELSE ER EN PRIORITET FOR DEN GRØNNE OMSTILLING

Danmark har en stærk grøn sektor med mange beskæftigede, der skaber stor værdi, vækst og understøtter eksporten. Det er et godt udgangspunkt for at levere løsninger og værdi til en grøn omstilling af hele samfundet frem mod 2050 [76].

Den grønne omstilling, herunder energilagingsområdet er dog udfordret af mangel på kvalificeret arbejdskraft særligt inden for industri-, bygge- og anlægssektoren, hvor der forventes en stigning i efterspørgslen på 10.000 årsværk frem mod 2030 [77]. Alene anlægsprojekterne i infrastrukturplanen forventes at komme til at kræve ca. 60.000 årsværk [78].

I 2030 forventes der at mangle 78.000 faglærte og 20.000 ingeniører og teknik- og it-uddannede. Ligeledes vil der mangle 26.000 med en mellemlang eller lang videregående uddannelse inden for det samfunds-faglige område [79]. Den grønne omstilling accelererer behovet for opdatering af kompetencer på tværs af alle uddannelsesniveauer og brancher og inden for alle led af værdikæden. Analyser peger dog ikke på store sektorforskydninger, hvor nogle sektorer bliver meget store på bekostning af andre, og Danmark skal derfor først og fremmest opkvalificere - ikke omskole [80].

Det offentlige udbud af efter- og videreuddannelse til den grønne omstilling er mangelfuldt. Det gælder både i relation til indholdet i uddannelserne, faglærernes kompetencer og fleksibiliteten og muligheden for at tilgå uddannelserne digitalt [76].

Flere arbejdsgivere benytter sig derfor af privat opkvalificering, interne kurser, netværk mv. og færre og færre benytter det offentlige efter- og videreuddannelsessystem (VEU). Flere virksomheder benytter eksterne konsulenter og køber sig til viden uden nødvendigvis at fokusere på egen læring.

Digitalisering spiller en afgørende rolle i den grønne omstilling og stiller yderligere krav til kompetencer. Heldigvis har Danmark og danske virksomheder et stærkt digitalt udgangspunkt, hvor man i vid udstrækning allerede benytter avancerede digitale teknologier. Også her, er man dog udfordret af mangel på arbejdskraft, og særligt SMV'erne halter bagefter både på den digitale og den grønne dagsorden [80]. Digitale kompetencer, tværfaglighed, et grønt mindset, viden om rapportering og dokumentation af bæredygtighed samt innovation er kompetencer til den grønne omstilling, som går på tværs af sektorer [77]. Derudover efterspørges specifikke kompetencer til udvikling og implementering af specifikke teknologier.

Mange virksomheder vil gerne omstille sig til det grønne, men er afventende, fordi teknologien og viden om, hvilken vej man skal gå, endnu ikke er klar. Særligt SMV'erne mangler viden om, hvad det vil kræve af kompetencer at løfte den grønne omstilling. Hvilke grønne teknologier og løsninger vil man satse på? Hvilke materialer og hvilke brændstoffer? Store virksomheder peger på, at udfordringen blandt andet består i, at politikerne ikke udstikker retning for arbejdet med den grønne omstilling, således er der ingen politiske grønne aftaler og initiativer for energitung industri, finanssektoren, forsvaret, handel, life-science og biotek, luftfart, produktion, service og it-virksomhed [77].

Uddannelse

Som udgangspunkt har Danmark et rimeligt omstillingsparat uddannelsessystem. Der er dog en systemisk forsinkelse fra erkendelse af et behov for nye kompetencer og til, at de færdiguddannede kandidater er klar. Styringsmekanismerne er ikke gearede til hurtigt at kunne omstille indholdet i uddannelserne og imødekomme en situation, hvor efterspørgslen efter kompetencer skifter hurtigere end tidligere [82].

Danmark er på bagkant med at uddanne et tilstrækkeligt antal personer inden for uddannelser, som er centrale i den grønne omstilling. For få unge vælger en erhvervsuddannelse, og for få unge går STEM-vejen i det videregående uddannelsessystem [7].



Der er stort potentiale i at bringe erhvervsliv og universiteter tættere sammen. Særligt de store virksomheder har et ønske om at komme tættere på forskning og udvikling, udveksle erfaringer og omsætte viden til forretning og vækst.

I DaCES arbejdsgruppe for uddannelse har repræsentanter fra centrale virksomheder og universiteter arbejdet på at få afdækket behovet for kompetencer inden for energilagring.

Arbejdet i gruppen er foreløbigt mundet ud i en individuel tilpasset fleksibel master med fokus på opgradering af kompetencer og efteruddannelse. Her kan personer med minimum en teknologisk eller naturvidenskabelig bachelor efterfulgt af to års relevant erhvervserfaring tage kurser fra fire danske universiteter. Uddannelsen er fleksibel både på tværs af universiteter og i varighed. Det er således muligt at tage kurser udbudt af AAU, AU, DTU og SDU, og uddannelsen skal gennemføres i løbet af 6 år. Kurserne er delt i tre emneområder: Energilagringsteknologier, P2X og Systemintegration. Læs mere om den fleksible master på DaCES' hjemmeside.

Det er desuden tanken at etablere et studiefællesskab i regi af DaCES for de kommende masterstuderende. DaCES arbejdsgruppe for uddannelse vil også etablere en projekt-børs, hvor virksomheder, universiteter og studerende kan foreslå projekter og finde inspiration og samarbejdspartnere. Projektbørsen vil samle eksisterende initiativer fra de fire universiteter samt virksomheder.



DACES ARBEJDSGRUPPER

Termisk energilagring

- Brian Elmegaard, professor DTU Construct
- Claus Schøn Poulsen, centerchef, Teknologisk Institut Køle- og Varmepumpeteknik, formand
- Christian Nodskov Duus Nielsen, CTO, ATE
- Christian T. Veje, institutleder, SDU
- Erik Gydesen Søgaard, emeritus AAU Kemi og Bio
- Fredrik Haglind, professor, DTU Construct
- Gerald Englmaier, adjunkt, DTU Construct, næstformand
- Geoffroy Gauthier, projektleder, PlanEnergi
- Hans Aage Hjuler, labmanager, Copenhagen Atomics
- Elie Najim, teknisk projektmanager, Heliac
- Dan Kofoed, projektleder, Heliac
- Jakob Hærvig, lektor, AAU Energy
- Jakob Jensen, forretningsudvikler, Heliac
- Jonas Illum Sørensen, produktmanager, Aalborg CSP
- Jianhua Fan, lektor, DTU Construct
- Jørgen Røhr Jensen, projektmanager, Niras
- Karine Blandel, senior forretningsudvikler, Hyme
- Mehran Nourbakhsh, leder af AI og digitale løsninger, Vestas
- Ming Chen, professor, DTU Energi
- Morten Herget Christensen, modellerings- og automatiseringsekspert, Hyme
- Ole Alm, udviklingschef, Andel
- Per Alex Sørensen, teamleder, PlanEnergi
- Rasmus Aaen, markedschef, Niras
- Thomas Steenberg, direktør, Copenhagen Atomics

Batterier

- Anders Bentien, professor, AU Bio- og Kemiteknologi
- Daniel Stroe, lektor, AAU Energi
- Dennis Vester, markedsføringschef, XOLTA
- Dorthe Ravnsbæk, professor, AU, næstformand
- Jakob Kløve Keiding, chefkonsulent, GEUS MiMA
- Jesper Østergaard, CEO, 4-leaf consulting
- Juan Maria García Lastra, professor, DTU Energi
- Juan Tan, forsker, GEUS MiMA
- Kasper Mayntz Paasch, lektor, SDU DME
- Kresten Kjær Sørensen, seniorkonsulent, Bitzer
- Kristian Birk Buhl, CSO, Danish Graphene
- Kristoffer Visti Graae, R&D scientist, FOM Technologies
- Lars Christian Christensen, vicepræsident, Vestas

- Michael Malmquist, proces- og optimeringsmanager, Koppers
- Peter Harwith, CEO, Sanispaces
- Simon Møiniche Skov, souschef, Teknologisk Institut Grønne Energisystemer
- Steffen Thrane Vindt, CEO, Innocell
- Stephan Christiansen Krabsen, community manager, EBO Consult
- Søren Bødker, CEO og stifter, VisBlue
- Søren Dahl, lead scientist, Topsoe, formand
- Søren Linderøth, professor og institutdirektør, DTU Energi
- Tejs Vegge, professor, DTU Energi
- Yogendra Kumar Mishra, professor, SDU NanoSyd

Power-to-X

- Anker Degn Jensen, professor, DTU Kemiteknik, formand
- Henrik Lund Frandsen, professor, DTU Energi
- Kristian Oluf Sylvester-Hvid, faglig leder, Teknologisk Institut Nanoproduktion og Mikroanalyse
- Simon Westergaard Lex, lektor, KU Samfundsvidenskab
- Thomas Lundgaard, viceinstitutleder, AU Bio- og Kemiteknologi
- Torben Nørgaard, CTO, MMM Center for Zero Carbon Shipping
- Wenjing (Angela) Zhang, lektor, DTU Sustain

Systemintegration

- Anna Marszal-Pomianowska, lektor, AAU Byggeri, By og Miljø
- Brian Vad Mathiesen, professor, AAU Planlægning, formand
- Chresten Træholt, lektor, DTU Wind
- Christoffer Greisen, COO, Hybrid Greentech
- Daniel Trier, teamleder, PlanEnergi
- Frank Elefsen, seniorkonsulent, Teknologisk Institut Teknologiuudvikling og -koordinering
- Gorm Bruun Andresen, lektor, AU MPE
- Kasper Mayntz Paasch, lektor, SDU DME
- Henrik Lund Frandsen, professor, DTU Energi
- Henrik Adler Nielsen, CEO og ejer, En2save ApS
- Henrik Madsen, professor, DTU Compute
- Henrik Wenzel, professor, SDU Grøn Teknologi
- Lars Christian Christensen, vicepræsident, Vestas
- Marie Münster, professor, DTU Management
- Niels Bahnsen, projektchef, Niras
- Peter Badstue Jensen, divisionsdirektør, Aalborg CSP, næstformand
- Poul Georg Moses, CTO P2X, Topsoe
- Rasmus Bo Bramstoft Pedersen, adjunkt, DTU Management
- Rasmus Løvenstein Olsen, lektor, AAU Elektroniske Systemer

Uddannelse

- Kasper Roed Jensen, vicepræsident, Vestas, formand
- Anke Hagen, professor, DTU Energi, næstformand
- Birgitte Høgh Frederiksen, CHRO, Green Hydrogen Systems
- Erik Carl Lehnskov Miranda, direktør, Next WTG Solutions Vestas
- Jens Ejbye Schmidt, institutleder og professor, SDU Grøn Teknologi
- Keld Lars Bak, viceinstitutleder, AU Bio- og Kemiteknologi
- Mads Pagh Nielsen, viceinstitutleder og lektor, AAU Energi
- Ole Stahl, Career events & Partnerships, Topsoe

DaCES styregruppe

- Hans Aage Hjuler, labmanager, Copenhagen Atomics, formand
- Lars Ditlev Mørck Ottosen, institutleder og professor, AU Bio- og Kemiteknologi, næstformand
- David Tveit, direktør, Teknologisk Institut Energi og Klima
- Jens Ejbye Schmidt, professor og institutleder, SDU Grøn Teknologi
- Lars Christian Christensen, vicepræsident, Vestas
- Lasse Rosendahl, institutleder og professor, AAU
- Lia Leffland, akademidirektør, ATV
- Peter Badstue Jensen, divisionsdirektør, Aalborg CSP
- Philipp A. Ostrowicz, senior forskningsrådgiver, CBS CSEI
- Simon Westergaard Lex, lektor, KU Samfundsvidenskab
- Søren Linderøth, institutdirektør og professor, DTU Energi
- Thoa Thi Minh Nguyen, R&D direktør, Topsoe
- Nanna Nyholm, projektleder, Industriens Fond (observatør)

DaCES bestyrelse

- Lars Ditlev Mørck Ottosen, institutleder og professor, AU Bio- og Kemiteknologi, bestyrelsesleder
- Hans Aage Hjuler, labmanager, Copenhagen Atomics, vicebestyrelsesleder
- Simon Westergaard Lex, lektor, KU Samfundsvidenskab
- David Tveit, direktør, Teknologisk Institut Energi og Klima
- Søren Linderøth, institutdirektør og professor, DTU Energi
- Lars Christian Christensen, vicepræsident, Vestas

REFERENCELISTE

- [1] DI Energi og Rambøll, 2022, Overskudsvarme. Overskudsvarmen er der – hvordan får vi den udnyttet.
- [2] Brian V. Mathiesen, Henrik Lund, Steffen Nielsen, Peter Sorknæs, Diana Moreno, Jakob Z. Thellufsen, 2021, Varmeplan Danmark 2021 - En Klimaneutral Varmeforsyning, Aalborg Universitet.
- [3] Dansk Fjernvarme, 2021, Power-to-X og Fjernvarme.
- [4] Europa-Kommissionen, 2021, Det årlige indeks over den digitale økonomi og det digitale samfund (DESI).
- [5] IDA, 2022, Internationale dimittenders værdi for samfundsøkonomien – med fokus på tekniske og naturvidenskabelige dimittender.
- [6] Axcelfuture, 2022. Vejen til mere udenlandsk arbejdskraft.
- [7] Tænk tanken Mandag Morgen og CONCITO, 2023, 8 anbefalinger til fremtidens grønne arbejdsmarked.
- [8] Energistyrelsen, 2022, Analyseforudsætninger til Energinet 2022.
- [9] Finansministeriet, 2022, Aftale mellem regeringen og Venstre, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre, Det Konservative Folkeparti om: Grøn skattereform for industri mv. (24. juni 2022).
- [10] Energinet, 2023, Hvorfor står nogle vindmøller stille i blæsevejr.
- [11] Energistyrelsen, 2023, Spar Energi – elforbrugsberegner.
- [12] Energy Modelling Lab, Dansk Fjernvarme, 2022, Udviklingen i kapacitet på termiske værker.
- [13] C. Augustine og N. Blair, National Renewable Energy Laboratory, 2021, Storage Futures Study Storage Technology
- [14] T. Schmidt, T. Pauschinger, P. A. Sørensen, A. Snijders et. al., Energy Procedia, 2018 Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling, s. 585-594.
- [15] W. Cole, W. Frazier og C. Augustine, »Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update,« NREL, 2021.
- [16] H. Lund, P. A. Østergaard, D. Connolly, I. Ridjan, B. V. Mathiesen, F. Hvelplund, J. Z. Thellufsen og P. Sorknæs, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 2016, Energy Storage and Smart Energy Systems, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, Vol. 11, s. 3-14.
- [17] Energistyrelsen, 2021, Analyseforudsætninger til Energinet 2021.
- [18] COWI, 2023, Udviklingen af datacentre og deres indvirkning på energisystemet.
- [19] W. van Helden, B. Fumey, G. Englmair, F. Kerscher, R. Cuypers, D. Groulx, D. Lager, S. Doppiu og C. Rathgeber, International Energy Agency, 2023, Technology Position Paper: Compact Thermal Energy Storage, s. 7.
- [20] International Renewable Energy Agency, 2020, Innovation Outlook: Thermal Energy Storage
- [21] McKinsey & Company, LDES council, 2022, Net-zero heat Long Duration Energy Storage to accelerate energy system decarbonization.
- [22] L. F. Cabeza, Elsevier, 2021, Advances in thermal energy storage systems - methods and applications - second edition.
- [23] Energistyrelsen, Viegand og Maagøe, 2022, Kortlægning af energiforbrug og opgørelse af energisparepotentialer i produktionserhvervene
- [24] International Renewable Energy Agency, 2021, Renewable Power Generation Costs in 2021.
- [25] Energistyrelsen, 2020, Comprehensive Assessment 2020 - Denmark reported to the European Commission.
- [26] Energistyrelsen, 2023, Klimastatus og -fremskrivning 2023.
- [27] International Energy Agency, 2018, The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning.
- [28] Dansk Fjernvarme, 2020, Procesvarme - en del af fjernvarmen bidrag til den grønne omstilling
- [29] H. Olsen og B. Elmegaard, DTU Nyheder, 2023, El skal erstatte naturgas i virksomhed.
- [30] Danmarks Statistik, 2022, Fjernvarme og naturgas mest udbredt opvarmning.
- [31] International Energy Agency, tilgået juli 2023, Annex 58 High-Temperature Heat Pumps
- [32] International Energy Agency, tilgået juli 2023, IEA Energy Storage Technology Collaboration Programme Tasks
- [33] Dominkovic, C. Bergaentzle og G. Englmair, DTU Nyheder Tine Naja Berg, 2020, New solution for reducing CO₂ from data centres and server rooms.
- [34] DTU, tilgået juli 2023, <https://cool-data.dtu.dk>.
- [35] Sanne Wittrup, Ingeniøren, 2020, DTU-test demonstrerer salt som solvarmelager, nr. 4, s. 14-15.
- [36] VEKS og Høje Taastrup Fjernvarme, pressemeddelelse, 2019, Gravemaskiner tog 1. spadestik
- [37] Rambøll, 2020, District Heating and Cooling Stock at EU level – task 2.1 in work package 2 of WEDISTRICT.
- [38] Europa-Parlaments og Rådets forordning (EU) 2019/631 af 17. april 2019, L 111/13.
- [39] Skatteministeriet, 2023, Kilometerbaseret vejafgift for lastbiler.
- [40] Transportministeriet, 2021, Aftale mellem regeringen (Socialdemokratiet), Venstre, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folke- parti, Radikale Venstre, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Liberal Alliance og Alternativet om Udmøntning af pulje til grøn transport.
- [41] Transportministeriet, Nyheder, 2021, 11 danske indenrigsfærger får tilskud til grøn omstilling.
- [42] Ritzau, Jesper Maack, 2022, To vundne udbud sikrer grønne færgeruter.
- [43] CIC Energigune, 2022, Interactive Chart on Battery Raw Material Demand and Supply Forecast.
- [44] HolonIQ, 2023, Defying gravity, 2022 Climate Tech VC funding totals \$70.1B, up 89% on 2021.
- [45] McKinsey, 2021, Battery Supply Tracker.
- [46] Avicenne, 2019, EU battery demand and supply (2019-2030) in a global context, Avicenne Energy report.
- [47] Fraunhofer ISI, 2021, Future Expert Needs in the Battery Sector, Fraunhofer ISI.
- [48] Statista, 2023, Projected global battery demand from 2020 to 2030, by application.
- [49] Europa-Parlamentet, pressemeddelelse, 2023, Making batteries more sustainable, more durable and better-performing.
- [50] OK, pressemeddelelse, 2021, OK og Vestas åbner batteridrevet lynladestation.
- [51] Europa-Kommissionen, 2022, Green Deal: EU agrees new law on more sustainable and circular batteries to support EU's energy transition and competitive industry.
- [52] Business Sweden in collaboration with Swedish Energy Agency, Business Finland, Innovasjon Norge, 2023, The Nordic Battery Value Chain.
- [53] XOLTA, 2020, 20% of the profit is used on green conversion.
- [54] Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, 2022, Aftale om udvikling og fremme af brint og grønne brændstoffer.
- [55] Tejs Vegge og Heine Anton Hansen, 2021, DTU Nyheder, 2021, Pathway for 'green ammonia' opens in new study.
- [56] Brintbranchen, tilgået juli 2023, Brintprojekter i Danmark – Brint i tal.
- [57] Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, Nyheder, 2022, Bred milliardaftale sætter turbo på nye grønne brændstoffer.
- [58] Europa-Kommissionen, 2020, En strategi for brint med henblik på et klimaneutralt Europa, COM/2020/301.
- [59] Fuel Cells and Hydrogen Observatory, 2023, Hydrogen Demand.
- [60] Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, 2023, Die Bundesregierung.
- [61] Europa-Kommissionen, 2023, Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs.
- [62] Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, Nyheder, 2022, Bred milliardaftale sætter turbo på nye grønne brændstoffer.
- [63] Danva, 2022, Vand i Tal 2022 Danmark.
- [64] Silhorko-Eurowater, tilgået juli 2023, <https://www.silhorko.dk/dk/groen-brint-produktion>
- [65] Anne Hauch, Rainer Küngas, Peter Blennow, Anders Bavnhøj Hansen, John Bøgild Hansen, Brian Vad Mathiesen, Mogens Bjerg Mogensen, 2020, Science, 370, Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis.
- [66] Ulrik Frohlke, 14/9-2022, Topsoe News, Topsoe and First Ammonia launch zero emission ammonia production with the world's largest reservation of electrolyzer capacity.
- [67] Anne Hauch og Peter Blennow, 2023, Solid State Ionics, 391, Solid oxide electrolysis cells – Interplay between operating conditions, fuel electrode overpotential and degradation.
- [68] Danish Offshore Industry, 2022, EUDP-støttet projekt vil med nyt anlæg lagre energi i ammoniak.
- [69] Henrik Lund, Brian V. Mathiesen, Jakob Z. Thellufsen, Peter Sorknæs, Miguel Chang, Mikkel S. Kanv, Iva R. Skov, 2021, IDAs Klimasvar 2045: Sådan bliver vi klimaneutrale. Ingeniørforeningen IDA.
- [70] Klima, Energi og Forsyningsministeriet, 2021, BEK nr. 1069 af 30/05/2021.
- [71] Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Steffen Nielsen, Peter Sorknæs, Diana Moreno, Jakob Zinck Thellufsen, 2021, Varmeplan Danmark 2021 – Baggrundsrapport.
- [72] Marie Münster, Daniel Møller Sneum, Rasmus Bramstof, Brian Elmegaard et al., 2020, Sector Coupling: Concepts, Potentials and Barriers, Proceedings of the 2020 AEIT International Annual Conference (AEIT).
- [73] Ebbe Kyhl Gøtske, Gorm Bruun Andresen, Marta Victoria, 2023, Cost and Efficiency Requirements for Successful Electricity Storage in a Highly Renewable European Energy System, PRX Energy 2, 2.
- [74] Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Frede Hvelplund et al., 2015, Applied Energy 145, s. 139-154, Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions.
- [75] Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Poul Alberg Østergaard et. al., 2015, AAU Planlægning, IDA's Energy Vision 2050: A Smart Energy System strategy for 100% renewable Denmark.
- [76] CONCITO, 2019. Den danske grønne beskæftigelse.
- [77] CONCITO, 2022. Job til grøn omstilling – beskæftigelseseffekter ved en kommende CO₂-afgift og nødvendige klimainvesteringer.
- [78] Arbejderbevægelsens Erhvervsråd, 2022. Infrastrukturaftalen kan hjælpe med at få uddannet 4.650 lærlinge.
- [79] IDA og Danske Gymnasier, 2021 Mismatch på det danske arbejdsmarked i 2030.
- [80] Tænk tanken Mandag Morgen, 2022. Manglende opkvalificering spænder ben for grøn omstilling.
- [81] Tænk tanken Mandag Morgen, 2022. Parat til et mere bæredygtigt samfund. Kompetencer til fremtidens grønne arbejdsmarked.
- [82] Børne og Undervisningsministeriet, 2022. Afrapportering fra tværministeriel arbejdsgruppe om grøn omstilling og opkvalificering.





PurePrint® by **KLS**
Produceret bionedbrydeligt
af KLS PurePrint A/S

ISBN 978-87-974889-1-1



STØTTET AF

INDUSTRIENS FOND