

TERMISK ENERGILAGRING

ELEKTRIFICERING MED FLEKSIBILITET 2025



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 planetens 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 fra forskning, industri og erhvervsliv på professionel vis.

Vi arbejder på tværs af energilagringsteknologier og faglige discipliner som natur- og ingeniørvidenskab, matematik, samfundsvidenskab, økonomi og humaniora osv. Målet er at skabe samarbejder, netværk og partnerskaber, der samler forskningsmiljøer og virksomheder for at adressere store samfundsmæssige udfordringer og reducere vores afhængighed af fossile brændstoffer.

DaCES’ arbejdsgrupper
DaCES leder og faciliterer fire tekniske arbejdsgrupper i termisk lagring, batterier, PtX og systemintegration, samt en arbejdsgruppe for uddannelse. Vi har tilmed en række specialiserede undergrupper inden for energilagring og -konvertering.

For medlemskab: www.daces.dk

DaCES er støttet af Novo Nordisk Fonden.

Disclaimer
DaCES har eneansvaret for rapporten, som ikke nødvendigvis afspejler de enkelte medlemsorganisationers egne holdninger, men er baseret på input fra og diskussion i DaCES arbejdsgruppe for termisk lagring

INDHOLD

Forord	4
Introduktion til termisk energilagring	5
Stort potentiale for brug af termisk energilagring	7
1. Behov for at dekarbonisere industriel procesvarme bæredygtigt og økonomisk	7
2. Stigende behov for fleksibilitet i energisystemet	7
3. Muliggør forbedringer i energieffektivitet	7
4. Mindske afhængighed af knappe ressourcer	8
Fokusområder for termisk energilagring	9
1. Begrænset bevidsthed om mulighederne og eksisterende skala inden for termisk energilagring	9
2. Strukturelle problemer for finansiering af højtemperatur termisk energilagring i tilstrækkelig skala	9
3. Begrænset antal testfaciliteter og -kapacitet hæmmer udviklingen af højtemperatur termisk energilagring	10
4. Manglende langsigtet støtte til demonstrationsanlæg bremser implementering hos store kommercielle aktører	10
5. Manglende klare planer for udfasning af gas til procesvarme forsinker elektrificeringsindsatsen og industriens implementering af termisk energilagring	11
CASE 1: Termisk energilagring for fleksibilitet i energisystemet	12
CASE 2: Drivhuse bidrager til at stabilisere elnettet gennem virtuelle kraftværker	15
CASE 3: Bæredygtig procesvarme til verdens førende mejeriproducent	17
DaCES Arbejdsgruppe For Termisk Energilagring	18
Reference Liste	19

FORORD

Vores fremtidige klimaneutrale energisystem vil primært være baseret på vedvarende energiproduktion og dens anvendelse i elektrificerede processer i hele systemet. Dette er godt for klimaet, men det udsætter os for uoverensstemmelser mellem energiproduktion og -forbrug. Dette skaber et enormt behov for at udvikle energilagring og fleksibelt energiforbrug – så vi kan lagre overskydende energi og samtidig reducere, hvor meget energi vi skal lagre. Her kan termisk energilagring (TES), og især højtemperaturvarianterne (HT-TES), spille en langt større rolle i at understøtte en konkurrencedygtig elektrificering af vores industrier i Danmark og Europa – ved at kombinere elektrificering, lagring og fleksibelt forbrug.

Dansk Center for Energilagring har udarbejdet denne rapport “Termisk Energilagring, Elektrificering med Fleksibilitet 2025”. Vi mener, at termisk energilagring (TES) er et på mange måder overset sæt af teknologier til at etablere et robust, fleksibelt og omkostningseffektivt energisystem. TES er den mest effektive og billigste energilagringsteknologi – når alt, hvad du behøver, er varme. Varme udgør halvdelen af vores endelige energibehov og omtrent halvdelen af vores globale drivhusgasudledning. I rapporten vil vi se på potentialet for TES-teknologier ved lav temperatur (0-100 °C), kold og høj temperatur og deres rolle i udviklingen af fleksibel elektrificering.

DaCES’ arbejdsgruppe for termisk energilagring har diskuteret og bidraget til denne rapport. Arbejdsgruppen samler forskere og eksperter fra universiteter, industri, vidensinstitutioner og GTS’er med aktiviteter i Danmark. Med denne rapport ønsker vi at understrege, at Danmark er blandt de første til at udvikle og anvende lav- og højtemperaturløsninger, hvor både universiteter, vidensinstitutioner og danske virksomheder er meget engagerede i nationale og internationale forsknings-, udviklings- og innovationsprojekter.

Vores rapport introducerer nogle af drivkræfterne og de nødvendige fokusområder for at accelerere udviklingen og anvendelsen af TES i den store omstilling af vores energisystem. Vi ønsker at øge forståelsen og bevidstheden om de store potentialer inden for termisk energilagring blandt beslutningstagere, institutioner og andre centrale aktører i den brede energisektor.

Vi håber at kunne inspirere til yderligere dialog om TES i vores fælles indsats for at skabe et stabilt og bæredygtigt energisystem til gavn for Danmark, vores industri, forskning og udvikling, vækst, erhvervsliv og samfund.

God læsning.

Anne Marie Damgaard
Direktør,
Dansk Center for Energilagring (DaCES)

DaCES: TERMISK ENERGILAGRINGSRAPPORT 2025
DaCES’ arbejdsgruppe for termisk energilagring har udarbejdet denne rapport med Aksel Nordvig Ladegaard, teknisk konsulent hos DaCES, som projektleder og Geoffroy Gauthier, PlanEnergi, forperson for gruppen for termisk energilagring.



Aksel Nordvig Ladegaard,
Teknisk konsulent,
Dansk Center for Energilagring

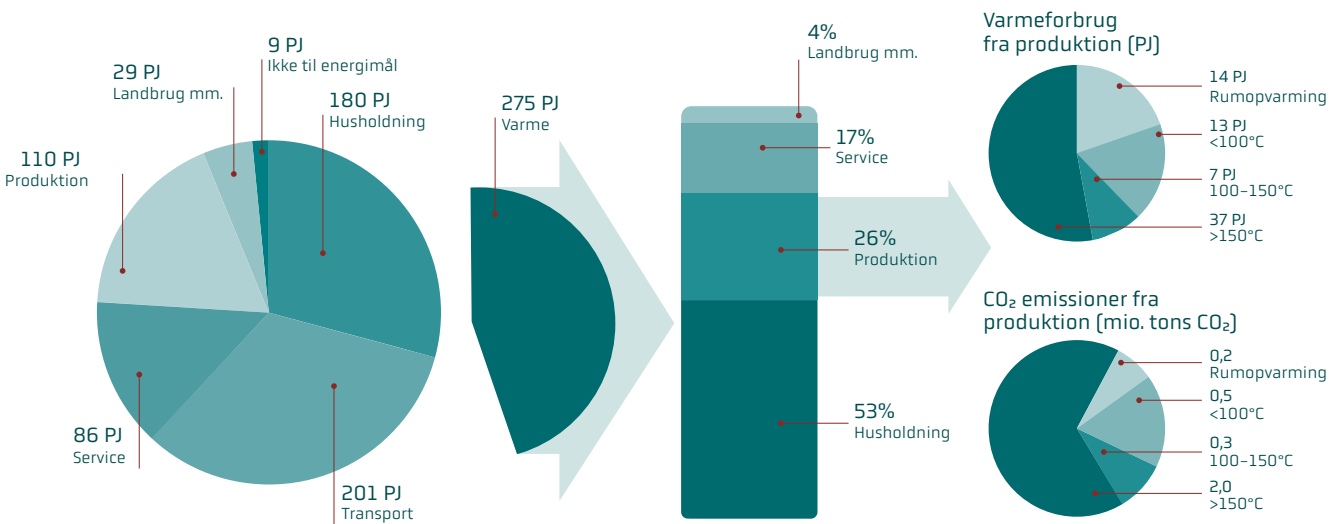


Geoffroy Gauthier,
Forperson for gruppen for termisk
energilagring, PlanEnergi

INTRODUKTION TIL TERMISK ENERGILAGRING

Vores samfund og livskvalitet er blevet muliggjort af et komplekst energisystem, hvilket kun er muligt takket være den fleksibilitet, der er indlejret i fossile brændstoffer. Vores fremtidige energisystem baseret på fluktuerende vedvarende energikilder vil kræve massive nye fleksibilitetskilder. Denne fleksibilitet vil blive opnået gennem en kombination af energilagring, konverteringsteknologier og smartere styring af både energiproduktion og -forbrug. Især behovet for økonomiske og store lagringskapaciteter er dér, hvor termisk energilagring udmærker sig: *Når energibehovet er i form af varme, er den billigste og mest effektive energilagringsteknologi termisk energilagring; og da omkring halvdelen af det endelige energiforbrug i moderne samfund går til opvarmning og afkøling, står TES som en afgørende aktør i fremtidens energisystem.*

Denne rapport vil fremhæve nogle af de uudnyttede potentialer i TES-teknologier – og anbefale fokusområder til at realisere dem. Rapporten vil primært omhandle nye anvendelser, da de gør det muligt for TES at spille en rolle i: **1.** Beskyttelse af over 20 millioner kvalitetsjob i Den Europæiske Union¹, **2.** Øge den samlede effektivitet af energisystemet **3.** Bidrage til dekarboniseringen af mere end 25 % af verdens CO₂-emissioner² [5], [7], [8], [9].



Figur 1: Den endelige energiefterspørgsel i Danmark i 2023. Den samme fordeling mellem boliger, industri og transport gælder generelt på verdensplan, med nogle regionale forskelle [10].

Som illustreret i figur 1 er en tredjedel af den endelige varmebehov til industrielle processer, og det meste af dette kan elektrificeres direkte med eksisterende eller modne teknologier. Elektrificering af de industrielle processer med TES vil dog muliggøre et mere effektivt, billigere og i sidste ende mere bæredygtigt energisystem [11], [12], [13]. Dette vil ske gennem en større fleksibilitet i, hvornår elektriciteten genereres og anvendes – hvilket muliggør en bedre udnyttelse af fluktuerende vedvarende energikilder, samtidig med at energiomkostningerne for industrien minimeres.

¹ Ekstrapolering af elektrificerbare industrielle processer i EU og antallet af arbejdspladser, der direkte skabes af disse sektorer ved hjælp af data fra Europa-Kommissionens Single Market platform og Agora Industry. [5], [6].

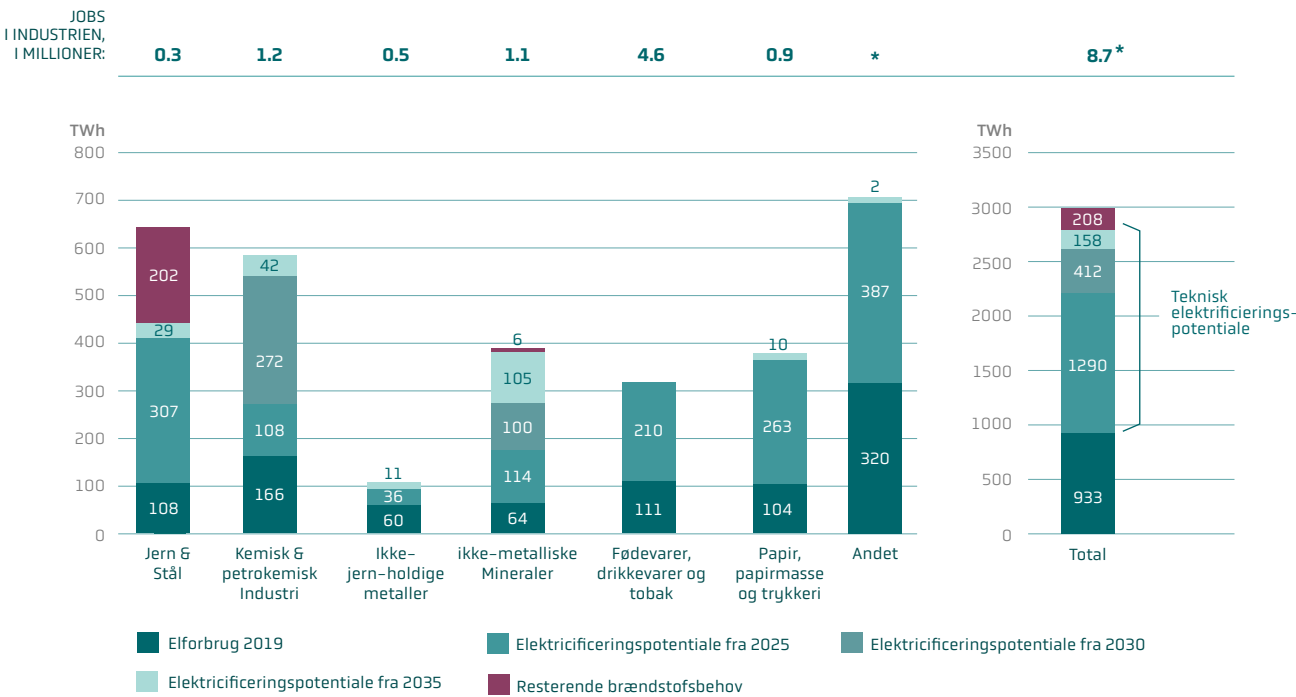
² Lavere skøn, også reduktioner i andre forurenende stoffer.

Til lavtemperaturapplikationer, især inden for fjernvarme og -køling, er TES en veletableret og kommerciel teknologi. Der mangler dog stadig implementering, og der er behov for implementering i stor skala – og i mange tilfælde bør man ideelt set implementere fjernvarme/-køling samtidig.

Udbredelsen af især højtemperatur-TES er dog for langsom til at nå EU's klimamål med en reduktion på 90 % af nettoemissioner i 2040 og klimaneutralitet i 2050. Med et groft estimat er der 40.000 industrielle dampkedler i EU, der primært bruger gas, hvoraf de fleste bør elektrificeres inden 2050 for at nå EU's klimamål [14], [15]. Dette kræver et tempo på ~1600 kedler om året, forudsat en deadline i 2050. Det er meget større end den eksisterende leveringskapacitet, da teknologiudbydere i øjeblikket kun kan levere et par enheder om året. Kapaciteten kan dog skaleres meget hurtigt op med det rette fokus, da der ikke er nogen væsentlig teknisk begrænsende faktor. De fleste TES-løsninger bygger på veletablerede teknologier og forsyningskæder, der gør det muligt for dem at skalere hurtigt under de rette rammebetingelser.

Denne rapport fremhæver fem fokusområder, der er nødvendige for at accelerere udviklingen og implementeringen af TES.

1. Begrænset bevidsthed om mulighederne og eksisterende skala inden for termisk energilagring.
2. Strukturelle problemer med finansiering af højtemperatur termisk energilagring i tilstrækkelig skala.
3. Begrænset antal testfaciliteter og -kapacitet skaber en flaskehals for udviklingen af højtemperatur termisk energilagring.
4. Manglende langsigtet støtte til demonstrationsprojekter bremser implementering hos store kommercielle aktører.
5. Manglende klare planer for udfasning af gas til procesvarme forsinker elektrificeringsindsatsen og industriens implementering af TES.



Figur 2: Det store tekniske potentiale for direkte elektrificering, med eller uden industri i EU-27. Genskabt fra Agora Industry [5], med tilføjelse af job, der er direkte skabt af hver industri, ved hjælp af Europa-Kommissionens data om det indre marked [6].

STORT POTENTIALE FOR BRUG AF TERMISK ENERGILAGRING

Der er et enormt behov for konkurrencedygtig dekarbonisering af industri, energilagring og energieffektivitet – og for at det foregår uden at skabe sociale, økonomiske eller ressourcemæssige byrder, der vil undergrave energiomstillingen. I denne kontekst tilbyder TES et bredt udvalg af teknologier der muliggør:

1. Konkurrencedygtig elektrificering af industriel varme.
2. Højere værdi og fleksibilitet ved udbygning af vedvarende energi.
3. Forbedringer af energieffektiviteten på alle niveauer, fra komponent- til energisystemniveau.
4. Reduktion af behovet for knappe mineraler, samtidig med at der bygges på europæiske industrielle styrker.

1. Behov for at dekarbonisere industriel procesvarme bæredygtigt og økonomisk

Industriel procesvarme står for op til 3/4 af industriens emissioner, hvilket skaber et presserende behov for at udvikle og skalere løsninger [5]. Løsningerne skal være økonomisk forsvarlige for den europæiske industri som helhed, som for nylig understreget i Mario Draghi-rapporten om behovet for hurtigt at opbygge Europas industrielle færdigheder, bæredygtige teknologier og konkurrenceevne [16]. Her er TES en katalysator for at udnytte den billige intermitterende vedvarende energi, da det muliggør meget større og billigere lagringskapacitet end sine modparter. Og det er klart, at store lagringskapaciteter er nødvendige for ethvert omkostningseffektivt klimaneutralt energisystem [12], [13]. Andre løsninger, såsom stor afhængighed af brint til procesvarme, er mindre energieffektive og kræver brint-infrastruktur, hvilket medfører større omkostninger. Brugen af brint bør i vid udstrækning begrænses til anvendelser, hvor der ikke er andre muligheder, eller hvor det giver unikke muligheder, for eksempel inden for langtidslagring af energi og i produktionen af grønne kemikalier og brændstoffer.

2. Stigende behov for fleksibilitet i energisystemet

Begrænsning (curtailment³) af vedvarende energiresourcer når op på 2-8% i de fleste markeder med store andele af vedvarende energi og efterhånden som mere og mere sol og vind tilføjes til nettet [17]. Cirka 7% af vindproduktionen blev begrænset i Danmark i 2021, hvilket svarer til omtrent det årlige elforbrug for 750.000 danskere. Længerevarende ubalancer er også vigtige at adressere, især i den nordlige del af Europa, hvor der er en overskydende elproduktion om sommeren og spidsbelastning om vinteren. Dette skaber en mulighed for billige lagringsteknologier, såsom damvarmelagre (PTES) og lignende, der kan muliggøre energilagring fra uge til uge.

Studier har vist, at TES, især store lavtemperatursystemer som f.eks. PTES, spiller to forskellige roller i energiomstillingen. I første omgang forbedrer TES effektiviteten af kraftvarmeværker (CHP) ved at lagre overskydende varme, der genereres under spidsbelastningsperioden for elproduktion, i stedet for at spilde den. Efterhånden som energiomstillingen skrider frem, skifter TES rolle til at indfange overskydende vedvarende elektricitet - f.eks. fra vind og sol - som ellers ville blive begrænset [12], [13].

Med færre store, kontrollerbare generatorer i spil understreger den danske TSO, Energinet, at utilstrækkelig effekt er en reel udfordring for Danmark i det kommende årti [18], [19]. Delleøsninger omfatter øget forbrugsfleksibilitet - evnen til at ændre energiforbruget som reaktion på forsyningsforholdene - og forlænge den varighed, hvor store mængder energi kan lagres til en rimelig pris.

3. Muliggør forbedringer i energieffektivitet

Termisk energilagring kan også muliggøre forbedringer i energieffektivitet på produkt-, proces- og energisystemniveau. Teknologierne, anvendelserne og forskningen er dog forskellige på hvert niveau.

På produktniveau kan termisk energilagring mindske varmetab, forbedre varme- og kølingsydelse mm. Et klassisk eksempel er brugen af faseskiftende materialer til at forbedre effektivitet eller køleydelse i køletransport. Et andet eksempel er at bruge zeolit til at forbedre tørreevnen og effektiviteten i opvaskemaskiner ved at udnytte dens termokemiske egenskaber.

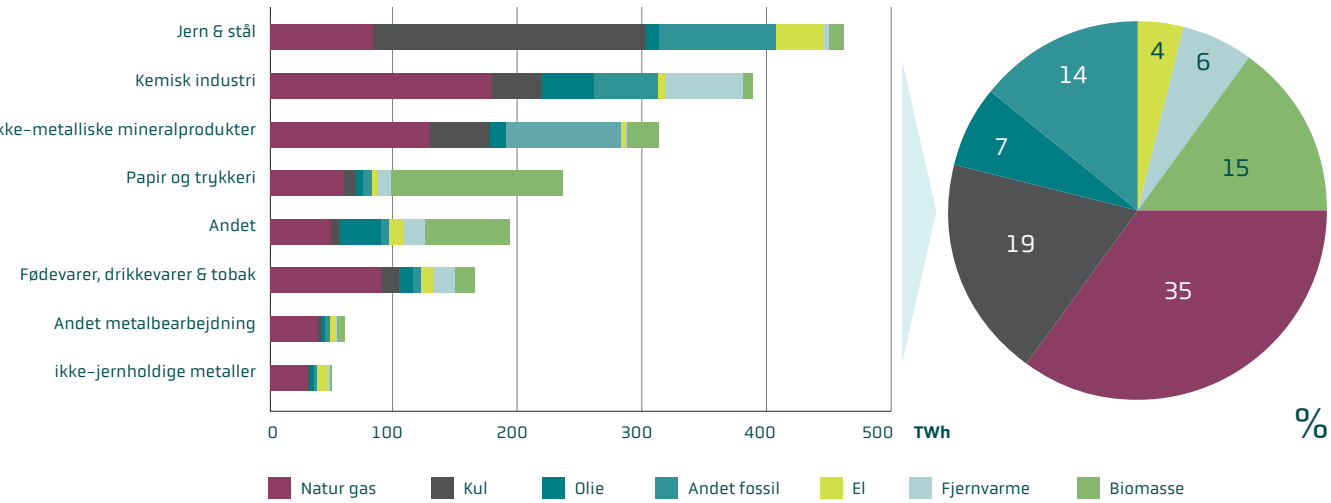
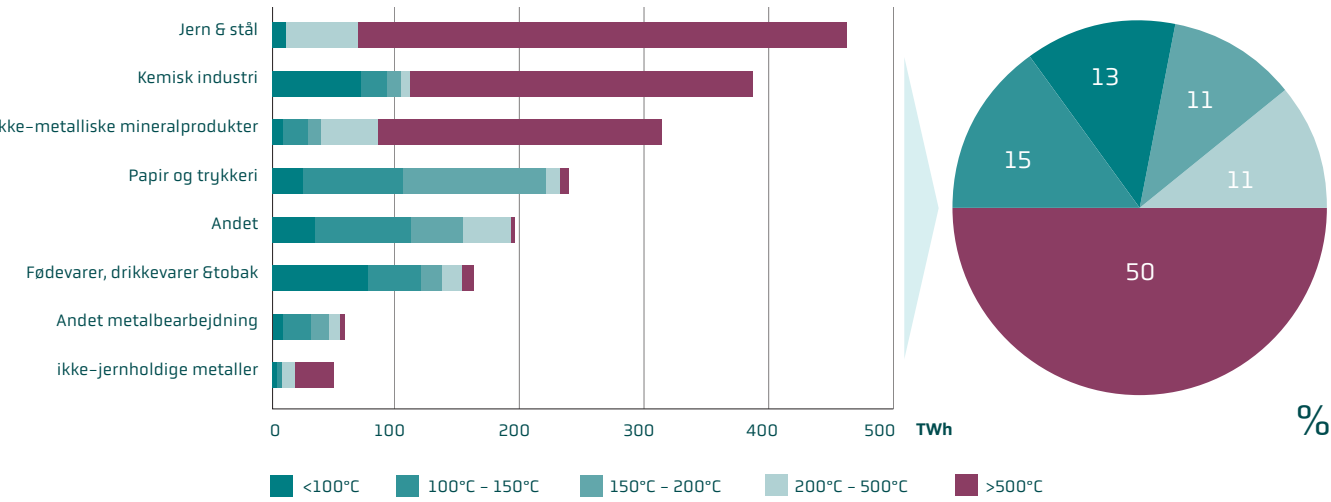
³ "Curtailment" er en reduktion af produktionen af vedvarende energi, som generelt foretages, når der er mangel på efterspørgsel eller kapacitet til at overføre energien til efterspørgslen.

På procesniveau kan større systemer muliggøre udnyttelsen af spildvarme og andet. For eksempel kan man anvende varmelagring mellem hver brygning eller brygningstrin på bryggerier – det kan give større energibesparelser sammenlignet med direkte elektrificering.

På energisystemniveau muliggør de store lagringskapaciteter ved TES fleksibilitet til lave omkostninger. Dette muliggør at ubalancer bliver udlignet gennem meget længere perioder, dvs. uger i stedet for timer. Det hjælper med at reducere indskrænkningen af vedvarende energi ved at tilføje fleksibel efterspørgsel efter elektricitet. De store lagre kan også øge udnyttelsen og effektiviteten af andre energiproducenter, især kraftvarmeværker (CHP), som beskrevet i casen: *Termisk energilagring for fleksibilitet i energisystemet.*

4. Mindske afhængighed af knappe ressourcer

Der er andre muligheder for at tilføje fleksibilitet til energisystemet og dekarbonisere procesvarme. På nuværende tidspunkt er der stor interesse i både batterilagringssystemer (BESS) og hydrogen. Begge teknologier kan dog skabe stor afhængighed af kritiske og sjældne mineraler. Til sammenligning bygger de fleste TES teknologier på tilgængelige materialer med etablerede forsyningskæder, og de almindelige lagringsmedier er vand, sten, slagger, keramik, salt og lignende. Mens resten primært er specialiserede, men etablerede industrielle komponenter, f.eks. varmevekslere, ståltanke, blæsere, pumper osv. Denne fordel kommer i høj grad teknologiudviklerne og medejere til gode – men det er en klar strategisk fordel at gøre TES til førstevalget, når det er muligt, da det kan reducere vores kollektive afhængighed af knappe ressourcer.



Figur 3: Hvordan industriel procesvarme genereres, og hvilke temperaturer der anvendes på tværs af industrier i EU27. Tilpasset fra Agora Industry, [5].

FOKUSOMRÅDER FOR TERMISK ENERGILAGRING

I DaCES arbejdsgruppe for termisk energilagring ønsker vi at fremhæve fem områder, der kræver særlig opmærksomhed for at fremskynde og realisere de mange fordele ved termisk energilagring i energiomstillingen.



DaCES arbejdsgruppe for termisk energilagring besøger GreenLab Skive – en pioner inden for udvikling og demonstration af fremtidens integrerede energisystem.

1. Begrænset bevidsthed om mulighederne og eksisterende skala inden for termisk energilagring

Der er alt for lidt bevidsthed om det store potentiale i termisk energilagring til at fremme energiomstillingen. Dette gælder blandt offentligheden generelt, men også i industrien og på politisk niveau. Det kan ses i fraværet af termisk energilagring i nationale politikker og EU-politikker, strategier og roadmaps, der udvikles for at støtte en bæredygtig energiomstilling. Der er i stedet givet større fokus til udbredelsen af brint og batterier - mens der ikke findes sådanne målrettede initiativer for termisk energilagring.

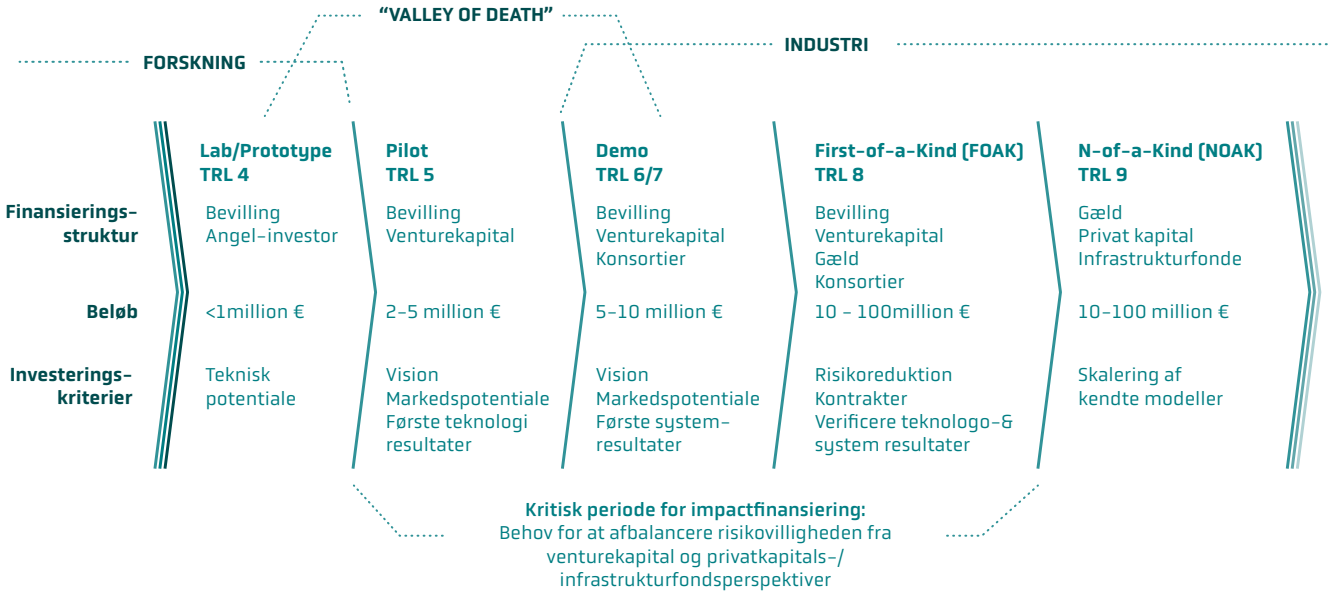
For at øge bevidstheden anbefales det systematisk at inddrage termisk energilagring i energisystemmodeller og -analyser. Termisk energilagring (TES) bør behandles på lige fod med andre lagrings-/fleksibilitetsteknologier såsom brint og batterier. Det gælder på alle niveauer, fra regionale til nationale, europæiske og internationale energisystemmodeller. I øjeblikket inkluderer de fleste veletablerede energisystemmodeller ikke TES i deres vurderinger. For eksempel inkluderer IEA's globale klima- og energimodeller ikke TES [20]. Generelt bør det analyseres yderligere, hvilke effekter der opnås ved at anvende TES til at gøre fremtidens industrielle elektrificering fleksibel.

2. Strukturelle problemer for finansiering af højtemperatur termisk energilagring i tilstrækkelig skala

Alle gode tekniske løsninger skal finansieres, og disse omkostninger afhænger i høj grad af, hvor risikabelt projektet bliver vurderet til at være. For energianlæg kræver det generelt håndtering af tre typer risici: Tekniske, finansielle og markedsmæssige risici.

Termisk energilagring er en kapitalintensiv teknologi med store startomkostninger, hvilket er en udfordring, især i betragtning af at det stadig er en relativt ny teknologi med få store implementeringer verden over. Business casen er generelt baseret på at dække de høje startomkostninger gennem reducerede energiomkostninger over en periode på 7 til 15 år. Selv hvis der kan findes stærke business cases, er de teknologiske risici i de store pilotsystemer en udfordring for at udbrede anvendelsen af termisk energilagring. Adgang til finansiering fra banker og institutionelle investorer kræver garantier for levetid og ydeevne, der er meget svære, til dels umulige, at give til modnende/nye teknologier. Mere risikosøgende investorer har en langt højere kapitalomkostning, hvilket igen kan ødelægge business casen for termisk lagring. Der findes også iboende markedsrisici, da business cases i høj grad er afhængige af en kombination af energiprisvolatilitet og levering af bæredygtig energi. Andre teknologier, såsom batterier og øget sammenkobling af landes elnet osv., bidrager til at reducere prisvolatiliteten og dermed mindsker business casen. Den samlede markedsstørrelse kan også mindskes med reduceret prisvolatilitet. Den grundlæggende business case er dog stærk, da omkostningerne til kapacitet i sagens natur er lavere end konkurrerende teknologier.

Termisk energilagring er dermed et tilfælde af det klassiske "first-of-a-kind"-puslespil (FOAK), hvor de første par tiltrængte storskalaanlæg har vist sig at være udfordrende at finansiere. Hverken venturekapital (VC), slutbrugere eller institutionelle investorer vil finansiere de høje startomkostninger - selv med aftagsaftaler - da risiciene anses for at være for store. For disse teknologier er en betydelig del af fordelene også eksternaliseret eller ikke direkte værdiskabende, f.eks. reduceret afhængighed af kritiske mineraler osv.



Figur 4: De typiske finansieringsbeløb og finansiering for hvert Technology Readiness Level (TRL) og fremhæver det store behov for risikovillig kapital i TRL 6-9. Tilpasset fra Climentum Capital, [22]. [22]

Derudover er investeringsstørrelsen for anlæggene, især til industrielle anvendelser, generelt i den nedre ende af, hvad der er attraktivt for investering- og kapitalfonde. Byrden af due diligence og administrative omkostninger er for stor i forhold til den samlede investering for mindre anlæg. De små anlæg repræsenterer typisk "kun" en investering på et par ti millioner euro.

For at løse FOAK-problemet er det nødvendigt at reducere de tekniske og markedsmæssige risici, da det vil understøtte reduktionen af de finansielle risici. Dette afhænger dog alt sammen af bevidstheden om de tekniske muligheder. Samt at industrien ikke forventer, at andre energiteknologier, såsom brint, biogas og lignende, løser deres problemer med dekarbonisering og energiomkostninger.

3. Begrænset antal testfaciliteter og -kapacitet hæmmer udviklingen af højtemperatur termisk energilagring

Udviklingen af højtemperatur-termisk energilagring (HT-TES) til industriel procesvarme- eller elproduktion hæmmes af en mangel på avancerede test- og valideringsfaciliteter i Europa. Innovatorer har brug for specialiserede prøvebænke til at evaluere nye lagringsmaterialer og -komponenter under realistiske cykliske forhold ved temperaturer på flere hundrede grader celsius. I øjeblikket er det kun få laboratorier og pilotsteder, der kan være vært for sådanne eksperimenter. Det skaber en flaskehals for opskalering af prototyper til markedsklare systemer.

Europæiske forskningsinteressenter har fremhævet behovet for uafhængige institutter til TES-materialetests og demonstrationssteder. Etablering af disse ville gøre det muligt for forskere og virksomheder at demonstrere pålideligheden, holdbarheden og sikkerheden af HT-TES-teknologiers.

Markedet har forskellige behov med hensyn til temperaturspænd, kapaciteter, integrationsovervejelser og omkostninger. Dette driver efterspørgslen efter omkostningseffektiv ydeevne på tværs af alle skalaer. Fremtidig udvikling skal imødekomme disse behov, fra materialer til komponenter og deres integration i systemer, der kan dekarbonisere procesvarme med økonomisk fordel.

Mere specifikt bør indsatserne fokusere på:

- (A) Langvarig ydeevnetest under forskellige driftsmønstre.
- (B) Udvikling af nye højtemperaturlagringsmaterialer med højere energitætheder og stabilitet.
- (C) Forbedring af varmevekslere til hurtigere opladning og afladning.
- (D) Mere materialetestning af beholdermaterialer, især ift. korrosion ved forskellige driftsmønstre i høj temperatur, strømninger og tryk.
- (E) Undersøgelse af mekaniske egenskaber efter forskellige temperaturcyklusser og belastningsprofiler, f.eks. termisk ekspansion, for både lagring-, komponent- og beholdermaterialer.
- (F) Digitalisering af termisk energilagring for at understøtte smart integration, kontrol, overvågning og optimering af TES inden for industrielle processer.

Der er altså en betydelig mulighed for at investere i fælles testfaciliteter og udviklingsprogrammer til højtemperatur-TES. Investeringer vil accelerere innovation i EU og reducere tiden til markedet for industrielle TES-løsninger. Det vil også uddanne ingeniører i design, udvikling og drift af højtemperatur-TES-systemer og dermed afhjælpe et kompetencegab på dette område.

4. Manglende langsigtet støtte til demonstrationsanlæg bremser implementering hos store kommercielle aktører

The Undersøgelse af den langsigtede ydeevne af enhver TES-teknologi – over flere år – er afgørende for dens anvendelse af store kommercielle aktører. Det er imidlertid en udfordring at sikre finansiering til sådanne langsigtede demonstrationer, da de fleste F&U-projekter er struktureret omkring korte tidsrammer på 2-4 år. Denne tid går ofte med planlægning, design, konstruktion og idriftsættelse af demonstrationsprojekter, med minimal tid efterladt til den kritiske test- og valideringsfase – hvilket underminerer selve formålet med at bygge demonstrationsanlæggene.

Efter projekternes afslutning er vidensinstitutioner nødt til at gå videre til nye projekter, da de ikke længere har mulighed for at dække deres udgifter til forskere og driftsomkostninger. Derudover har mange finansieringsprogrammer strenge regler om afskrivning af aktiver, hvilket gør det sværere at holde demonstrationen kørende efter projektperiodens afslutning, selvom omkostningerne til drift og vedligeholdelse kunne findes.

De fleste F&U-programmer dækker heller ikke driftsomkostninger, selv ikke i projektperioden. Incitamentet til at udnytte outputtet fra demonstrationsprojekter fjernes eksplicit: Enhver indkomst fra et demonstrationsprojekt skal normalt opvejes af en reduktion i tilskuddet. Selvom sådanne regler tydeligvis eksisterer af gode grunde for at modvirke unfair konkurrence og ulovlig statsstøtte, komplicerer de og kan hindre langsigtet succes med demonstration af termiske energilagringsteknologier.

5. Manglende klare planer for udfasning af gas til procesvarme forsinket elektrificeringsindsatsen og industriens implementering af termisk energilagring

Den stærke politiske forpligtelse til udfasning af gas til procesvarme er afgørende for en vellykket energiomstilling. Dette gælder for beslutningstagere i industrien: Når valget af varmekilde ikke længere omfatter naturgas, skal spørgsmålet omformuleres med hensyn til, hvilken tilgængelig eller kommende teknologi, der er bedst egnet som erstatning, i stedet for at spørge, hvornår eller endda om en mindsket afhængighed af naturgas bør tilstræbes.

Styrken ved at have klare dekarboniseringsmål for udfasning af gas, strækker sig helt op til forskningen. De problemer, som industrien står over for, inspirerer og former ofte forskningsprojekter. Alle projekter, der undersøger det teknoøkonomiske potentiale i et industriområde, vil have et meget anderledes analyseomfang, hvis der er givet en kendt dato for udfasning af gas, eller hvis der er fastsat CO2-afgifter med kendte værdier.

Case 1

TERMISK ENERGILAGRING FOR FLEKSIBILITET I ENERGYSYSTEMET

Høje Taastrup Damvarmelager er det første ”korttids-” damvarmelager med en unik forretningsmodel. Lagringssystemet på 3.300 MWh øger effektiviteten og driftfleksibiliteten hos de eksisterende kraftvarmeværker, samtidig med at det giver årlige økonomiske fordele på 5-7 millioner kr.

Mere information:
www.planenergi.dk
Geoffroy Gauthier, Forperson for gruppen for termisk energilagring, PlanEnergi

Storskala termisk energilagring tilbyder betydelige miljømæssige og økonomiske fordele ved at koble varme- og elsektoren sammen, især i energisystemer med mange forskellige energiproduktionsenheder. Høje Taastrup Damvarmelager (PTES) illustrerer dette potentiale ved at skabe fleksibilitet for el- og varmesystemerne i hele hovedstadsområdet og bidrage bredt til energiomstillingen i hovedstadens energisystem.

PTES er generelt designet til langtidslagring af varme, generelt lagring mellem uger. Høje Taastrup PTES er dog unik ved primært at være rettet mod lagring inden for hver uge. Det gør det muligt for kraftvarmeværker (CHP) at fokusere på spidslast-elproduktion og reducere brugen af spidslast-gaskedler. Simuleringer viser et potentiale for at reducere spidslast-gaskedler med 24 GWh årligt og øge varmeproduktionen fra CHP'er med 25 GWh årligt. Kort sagt gør lageret det muligt for kraftvarmeværkerne at lagre den overskudsvarme, der produceres, når der fokuseres på at opfylde spidsbelastningsbehovet for el.

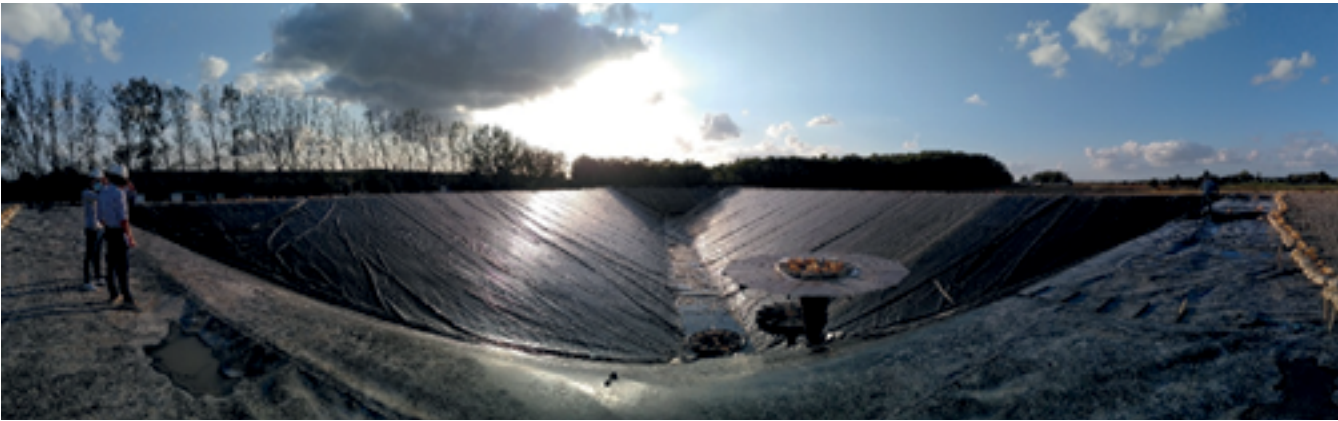
PTES er opladt med varme produceret af fire store kraftvarmeværker (med en samlet kapacitet på 2.050 MW) og tre affaldsforbrændingsanlæg (med en samlet kapacitet på 400 MW) gennem det omfattende transmissionsnetværk i Storkøbenhavn. Den lagrede varme aflades derefter til det lokale fjernvarmenet i Høje Taastrup, hvilket er med til at reducere spidslastproduktionen fra de lokale gaskedler (1.900 MW). Under afledningen ledes køligere returvand til bunden af lageret, mens varmt vand distribueres fra toppen via et rørnetværk til kunder i Høje Taastrup.

PTES'et har et lagervolumen på 70.000 m³, en opladnings- og afladningskapacitet på 30 MW og en energilagringskapacitet på 3.300 MWh. Ifølge designsimuleringer forventes dette system at generere en årlig økonomisk fordel på 5-7 millioner kr. for fjernvarmenetværkene i Storkøbenhavn [23].

Finansiering, ejerskab og forretningsmodel

En ny forretningsmodel understøtter den succesfulde implementering af PTES'et. VEKS, et kommunalt ejet varmetransmissionselskab, og Høje Taastrup Fjernvarme, et forbrugerejet fjernvarmedistributionselskab, ejer PTES-anlægget i fællesskab. VEKS har sikret sig rettighederne til at bruge lageret i 20 år ved at yde årlig compensation. En samarbejdsaftale sikrer, at Høje Taastrup Fjernvarme håndterer den daglige vedligeholdelse og overvågning af anlægget.

De økonomiske fordele ved lageret fordeles mellem interessenterne i forhold til deres andel af fordelene. Fordelene er blevet evalueret før projektimplementeringen ved hjælp af Balmorel, en komplet model af energisystemet i Storkøbenhavn. Forsynings-, energi- og fjernvarmeselskaberne (VEKS, CTR/HOFOR) opnår 56% af fordelene, primært fra besparelser på levering af spidsbelastningsbehovet, da disse selskaber også ejer spidslastproduktionsenhederne i Høje Taastrups fjernvarmenet. Kraftvarmeproducenterne deler 28% af fordelene, mens de tre affaldsforbrændingsanlæg får de resterende 16%. Alle partnere, der drager fordel af projektet, bidrager med et fast årligt gebyr i 20 år for at sikre lagringens tilgængelighed og langsigtede funktionalitet. Den største operationelle ændring er for kraftvarmeproducenterne, da lagringen muliggør en langt mere fleksibel drift og større fokus på elmarkederne.



Figur 1: Billede af PTES i Høje Taastrup under opførelse.

Fordelene for affaldsforbrændingsanlæggene opstår hovedsageligt om sommeren, hvor affaldet stadig skal afbrændes, selv når varmebehovet er lavt. Her fungerer lageret som et dagligt lager, der udjævner de daglige variationer i varmebehovet (hovedsageligt til varmt brugsvand). Således supplerer lageret delvist akkumulatortankene (TTES) i Storkøbenhavn, selvom disse lagre har en opladnings-/afladningskapacitet, der er cirka ti gange højere end damvarmelageret. Tankene aflader dog til fjernvarmens transmissionsnetværket, hvilket mindsker deres direkte konkurrence til PTES.

PROJEKT STATUS	IN COMMERCIAL OPERATION, SINCE FEBRUARY 2023	
Tekniske Parametre	Maksimal opladnings-/afladningskapacitet [MWth]:	30/30
	Max energi energilagringskapacitet [MWh]:	3,300
	Response tid [s]:	3,600 (0.5 MW/min)
	Round-trip effektivitet [%]:	87% in year 1 89% in year 2
	Forventes at nå 90-95 % i de følgende år, efterhånden som jorden varmes op.	
Økonomiske parametre	Lagringsanlæggets levetid [år]:	≥ 20
	referenceenergiomkostninger [€/MWh]:	102 (elektricitet)
	CAPEX [€/kW]:	405
	OPEX [€/MWh]:	69 per MWh kapacitet pr. år 8.3 per MWh varme lageret
	LCOE [€/MWh]:	-
Tilbagebetalingstid for investeringen [år]: 11.6		
Bemærk, at nogle værdier er designværdier. For mere information henvises til den detaljerede business case, der er præsenteret i IEA-ES Task 41, [24] eller præstationsanalysen i [23] og [25].		

Tabel 1: Grundlæggende information om Høje Taastrup PTES.



Case 2

DRIVHUSE BIDRAGER TIL AT STABILISERE ELNETTET GENNEM VIRTUELLE KRAFTVÆRKER

SCANGRID og San Electro Heat har udviklet en intelligent opvarmningsløsning, der gør det muligt for drivhuse at elektrificere med lavere omkostninger. Ved at anvende eksisterende rør og tanke til termisk energilagring, kan drivhuse absorbere overskydende vedvarende elektricitet og levere værdifulde systemydelser, der understøtter energiomstillingen. Men det kræver en specialiseret elkedel og intelligent styring.

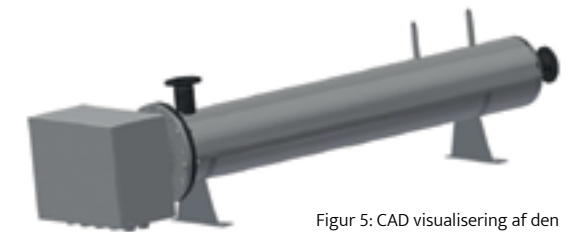
Mere information:
www.scangrid.dk and www.san-as.com
Carsten Vammen, grundlægger og direktør, SCANGRID
John Baarsgaard Kristensen, teknisk salg, SAN Electro Heat

Drivhuse kan blive store fleksible energiforbrugere og bidrage til at opretholde balancen i elnettet, samtidig med at de sænker deres energiomkostninger. Det bliver gjort muligt af SCANGRIDs virtuelle kraftværk og San Electro Heats' elkedler. Drivhuse er betydelige energiforbrugere, primært til opvarmning, som traditionelt er blevet leveret af naturgas, olie og biomasse. Siden slutningen af 2010'erne har der været en betydelig stigning i brugen af fjernvarme, men denne mulighed er ikke tilgængelig i mange regioner. Elektrisk opvarmning er en anden mulighed, men uden lagring udsætter det drivhuse for fluktuerende elpriser. Heldigvis kan drivhuse bruge deres store vandtanke og -systemer som varmebatterier, der lagrer den fluktuerende, men billige elektricitet som varme.

Elproduktion og -forbrug i elnettet skal stemme overens hvert sekund. Men med en stigende andel af ukontrollerbar energiproduktion er der et voksende behov for kontrollerbart forbrug, hvilket skaber en mulighed for fleksible energiforbrugere, såsom drivhuse med lagring. .

Dette kræver:

1. En elkedel, der er designet til at fungere ved meget højere effekt, da det samme varmebehov skal dækkes på færre timer.
2. Intelligent styring af opvarmningen, så den imødekommer ejernes og elnettets behov, da lavere energiomkostninger er sekundære i forhold til virksomhedens kerneaktivitet, nemlig plantevækst.



Figur 5: CAD visualisering af den store elkedel.

De to virksomheder, SCANGRID og San Electro Heat, har i fællesskab udviklet en opvarmningsløsning til store danske drivhuse. Et vigtigt designelement er den fleksible gruppering af elkedlens varmeelementer, der muliggør effektiv drift på mange forskellige effektniveauer afhængigt af elnettets behov.

Gennem aggregering i SCANGRIDs virtuelle kraftværk kan drivhuse deltage i de fleste markeder for balancering og systemydelser. Dette understøtter energiomstillingen, samtidig med at energiomkostninger reduceres yderligere, uden at kompleksiteten for ejeren øges.

"Drivhuse med elkedelbaserede varmesystemer har en indbygget fordel, idet de kan balancere elnettet ved at bruge deres rør og tanke som en form for energilagring. De kan absorbere store mængder overskydende elektricitet fra solceller og hurtigt stoppe deres forbrug, når en sky dækker for solen. På denne måde kan drivhuse bidrage til at stabilisere elnettet ved at tilbyde både balanceringsydelser og energilagring – og det er et af de bedste eksempler på replikerbar og vellykket sektorkobling i energisektoren."

som forklaret af Carsten Vammen fra SCANGRID.

Case 3

BÆREDYGTIG PROCESVARME TIL VERDENS FØRENDE MEJERIPRODUCENT

Energilagring baseret på smeltet salt fra Hyme er nu meget tættere på at levere procesvarme i stor skala kontinuerligt hele året rundt. Med støtte fra EUDP har Hyme bygget og testet et 1,2 MWh demonstrationsanlæg og udvikler nu sit første kommercielle tilbud. I samarbejde med Arla designer Hyme et af verdens største industrielle termiske energilagringssystemer på 40 MW/200 MWh for at dekarbonisere varmeforsyningen på Arla-mejeriet i Holstebro

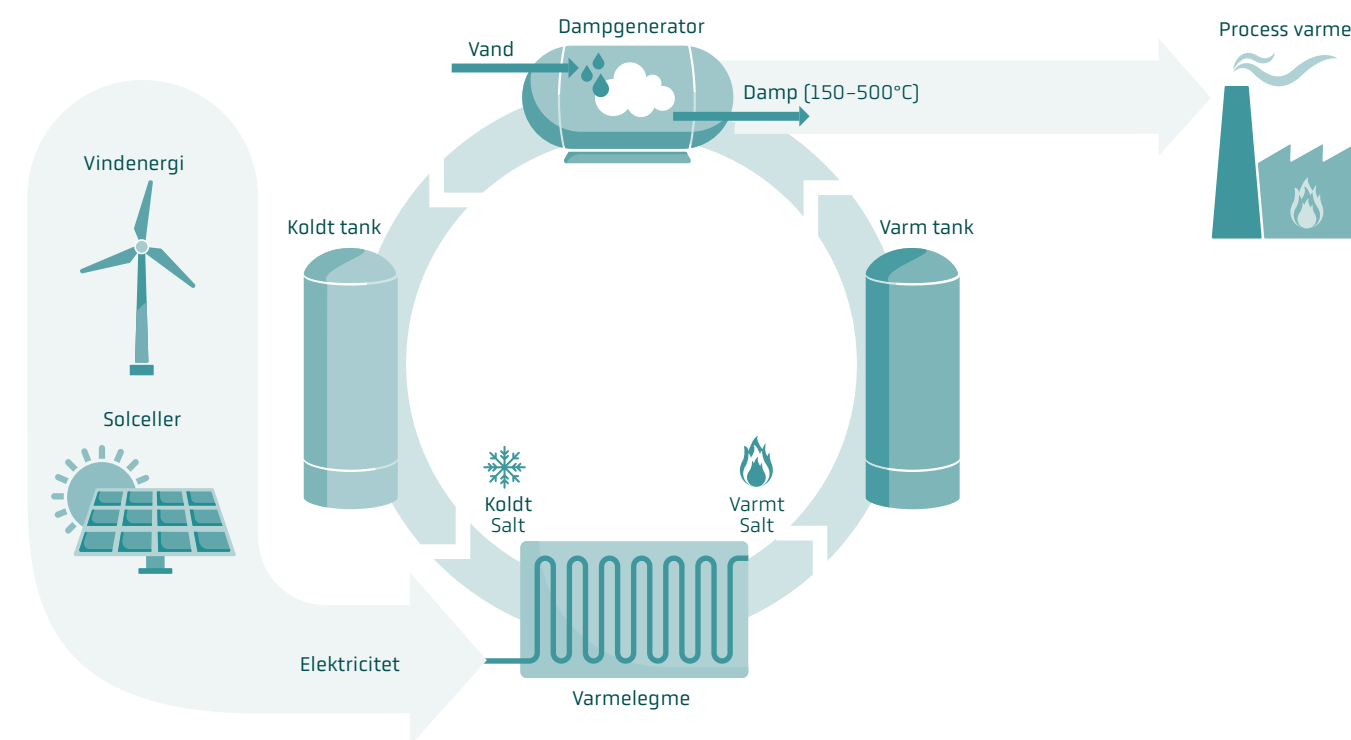
Mere information:
www.hyme.energy
Karine Blandel, Business Development Lead, Hyme

Hyme, etableret i 2021, med ~30 ansatte, udvikler smeltet salt-energilagring baseret på hydroxidsalte, da det muliggør høje energitætheder⁴. Virksomheden færdiggjorde konstruktionen af deres industrielle demonstrationsanlæg (1,2 MWh lagerkapacitet) i april 2024 og har testet og opgraderet det siden da. Projektet modtog støtte fra EUDP og sigter mod fuldt ud at demonstrere og reducere risici ved funktionerne på Hymes kommercielle produkt. Hyme udvikler nu deres første kommercielle tilbud. Det har krævet en indsnævring af det tekniske omfang ved yderligere at fokusere på slutkundens behov og finde de rigtige partnere til de første enheder. Det har ført til fokus på pålidelighed, reduktion af CAPEX og i første omgang et lidt lavere temperaturspænd. Dette fokus på at udvikle deres kommercielle produkter kommer efter års intensiv forskning i grundlæggende teknologi, hvilket var nødvendigt for at bevise teknologivisionen.

Hyme samarbejder i øjeblikket med Arla om at udvikle verdens største industrielle TES for fuldt ud at dekarbonisere varmeforsyningen på Arlas mælkepulverfabrik i Holstebro, samtidig med at energiomkostningerne reduceres betydeligt. Da systemet har store startomkostninger og medfører FOAK-risici, søger de EU-finansiering for at reducere de økonomiske risici – hvilket understreger det fortsatte behov for støtte.

Enheden er planlagt til at kunne lagre 200 MWh og levere damp ved ~220 °C kontinuerligt hele året rundt. Dets store lagerkapacitet og begrænsede pladsbehov skalerer mindre plads effektivt⁵.

Lokationen er særligt attraktivt på grund af den høje udbredelse af vedvarende energi og tilgængelig kapacitet i det lokale elnet. Dette er altafgørende, da den underliggende business case er baseret på at oplade en hel dags energiforbrug på en håndfuld timer - ved at anvende ladekapaciteten på 40 MW.



Figur 6: Illustration af Hymes lagringskoncept. Temperaturspænd er optimeret til hver konkret case.

⁴ Hydroxidsalte har høje specifikke energikapaciteter, dvs. hvor meget energi der kræves for at hæve det 1 grad Celsius.

Dette gør det muligt at lagre mere energi i et håndterbart temperaturspænd.

⁵ For eksempel vil 200 MWh BESS kræve 32-65 20-fods containere med begrænset mulighed for at udnytte den vertikale plads.



Besøg i forskningslaboratorierne for elektrokemi og termisk analyse på DTU Energi med DaCES-arbejdsgruppen for termisk energilagring, november 2024

DACES ARBEJDSGRUPPE FOR TERMISK ENERGILAGRING

- Adam Rasmus Jensen, Senior Researcher, DTU Construct
- Adriano Sciacovelli, Professor, DTU Construct
- Ahmad Arabkoohsar, Professor DTU Construct
- Anders Larsen Reichhelt, Business Developer, Andel
- Christian Nodskov Duus Nielsen, CTO, ATE
- Claus Schøn Poulsen, Director, Danish Technological institute
- Dan Kofoed, Project Manager, Heliac
- Erik Gydesen Søgaard, Emeritus, AAU Kemi og Bio
- Fredrik Haglind, Professor, DTU Construct
- Geoffroy Gauthier, Team Leader, PlanEnergi
- Gerald Englmaier, Associate Professor, DTU Construct
- Hans Aage Hjuler, Lab Manager, Copenhagen Atomics
- Ioannis Sifnaios, Researcher, DTU Construct
- Jakob Hærvig, Associate Professor, AAU Energy
- Jianhua Fan, Associate Professor, DTU Construct
- Jesper Nielsen, Senior electrical Specialist, Innovation & Concepts, Vestas
- John Baarsgaard Kristensen, Technical Sales, SAN Electro Heat
- Karine Blandel, Business Development Lead, Hyme
- Mads Emil Dalhoff Greisen, Consultant, Niras
- Mads Johnbeck, Product Engineer, FORCE Technology
- Ming Chen, Professor, DTU Energy
- Morten Herget Christensen, Team Manager, Danish Technological institute
- Paride Gullo, Associate Professor, SDU
- Per Alex Sørensen, Project Manager, PlanEnergi
- Peter Munk, Technical Manager, SAN Electro Heat
- Peter Estacio Franco Oxtorp, Chief Consultant, Andel
- Thomas Steenberg, Director, Copenhagen Atomics

REFERENCE LISTE

[1] B. Møller, “Manglen på havvindsbud i Nordsøen har rystet regeringen og Danmarks grønne omstilling,” Rådet for Grøn Omstilling. Accessed: Aug. 19, 2025. [Online]. Available: <https://rgo.dk/manglen-paa-havvindsbud-i-nordsøen-har-rystet-regeringen-og-danmarks-groenne-omstilling/>

[2] G. P. D. GPDK, “Green Power Denmark og Dansk Erhverv: Danmark mangler en elektrificeringsplan | Green Power Denmark.” Accessed: Aug. 19, 2025. [Online]. Available: <https://greenpowerdenmark.dk/nyheder/green-power-denmark-dansk-erhverv-danmark-mangler-elektrificeringsplan>

[3] D. E. DE, “Dansk Erhverv: Danmark halter langt efter EU’s elektrificeringsmål – udviklingen skal firedobles,” Dansk Erhverv. Accessed: Aug. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.danskerhverv.dk/presse-og-nyheder/nyheder/2025/juni/dansk-erhverv-danmark-halter-langt-efter-eus-elektrificeringsmal--udviklingen-skal-firedobles/>

[4] G. P. D. GPDK and D. Erhverv, “Sæt grøn strøm til Danmark,” 2025.

[5] M. Rehfeldt, S. Bussmann, and T. Fleiter, “Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU,” Agora Industry, Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 10178 Berlin | Germany, 2024. Accessed: Oct. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-20_IND_Electrification_Industrial_Heat/A-IND_329_04_Electrification_Industrial_Heat_WEB.pdf

[6] “Sectors - European Commission.” Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors_en

[7] F. Pag, W. Gruber-Gatzl, and J. Fluch, “IEA ES TCP: Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) - technology position paper january 2024,” IEA Solar heating and Cooling technology collaboration Programme, 2024. Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-Technology-Position-Paper-SHIP-2024-01.pdf>

[8] H. Lund, B. Vad Mathiesen, J. Z. Thellufsen, M. Kany Strunge, and I. Ridjan Skov, “IDAs Klimasvar 2045: sådan bliver vi klimaneutrale,” 2021. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://ida.dk/om-ida/idas-maerkesager/groen-omstilling/klimasvar/idas-klimasvar-2045-se-rapporten>

[9] C. Rasmussen, E. Ø. Mortensen, H. Wenzel, M. Ambye-Jensen, and U. Jørgensen, “Scenarier for anvendelse af biomasseressourcer i fremtidens produktionssystemer for fødevarer, energi og materialer inden for rammerne af gældende politik for landbrug, miljø, klima, natur og energi”.

[10] 2023 DaCES, “DaCES Status Strengths Synergies 2023,” Copenhagen, 2023. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: https://daces.dk/wp-content/uploads/2024/06/DaCES_StateOfTheNation_UK_Online_v2_June2024.pdf

[11] P. Sorknæs, J. Z. Thellufsen, K. Knobloch, K. Engelbrecht, and M. Yuan, “Economic potentials of carnot batteries in 100% renewable energy systems,” Energy, vol. 282, p. 128837, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128837.

[12] T. B. K. Christensen, H. Lund, and P. Sorknæs, “The role of thermal energy storages in future smart energy systems,” Energy, vol. 313, p. 133948, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133948.

[13] H. Lund, P. A. Østergaard, M. Yuan, P. Sorknæs, and J. Z. Thellufsen, “Energy balancing and storage in climate-neutral smart energy systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 209, p. 115141, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115141.

[14] L. Payen, L. Blaisonneau, and I. GAIN-NACHI, “ALLICE - Energies Territoires & Enthropie - Obstacles to and levers for the development of high-temperature heat storage in industry,” ALLICE, Study, 2024.

[15] E. Comission, “2040 climate target - European Commission,” 20240 climate target. Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en

[16] M. Draghi, “The Draghi report: The future of European competitiveness.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en

[17] H. Holttinen and B. H. Jørgensen, “IEA Wind TCP Annual Report 2023,” IEA WIND TCP, 2024. Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/390116670/IEA_Wind_TCP_Annual_Report_2023_ExecutiveSummary_251124_k1.pdf

[18] Energinet, “Redegørelse for elforsyningssikkerhed 2024 - høringsversion,” 2024. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://energinet.dk/media/ibep3n0t/horingsversion-redegorelse-for-elforsyningssikkerhed-2024.pdf>

[19] S. Hildebrandt, “Alvorlig strøm-mangel truer Danmark: »Det er helt uholdbart« | Ingeniøren,” Ingeniøren, Dec. 04, 2024. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://ing.dk/artikel/alvorlig-stroem-mangel-truer-danmark-det-er-helt-uholdbart>

[20] “Global Energy and Climate Model – Analysis,” IEA: global energyg and climate model. Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>

[21] Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955, vol. 231. 2023. Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>

[22] C. Capital, “Solving the FOAK puzzle — Addressing Capex financing for first-of-a-kind plants in the green...,” Medium. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://medium.com/@climentum/solving-the-foak-puzzle-addressing-capex-financing-for-first-of-a-kind-plants-in-the-green-45ec6285c29>

[23] I. Sifnaios and A. R. Jensen, “Performance analysis of the Høje Taastrup water pit thermal energy storage,” J. Energy Storage, vol. 131, p. 117504, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117504.

[24] “Collection of Case Studies.” Accessed: Jun. 04, 2025. [Online]. Available: <https://iea-es.org/task-41/collection-of-case-studies/>

[25] I. Sifnaios, A. R. Jensen, and S. Furbo, “Høje Taastrup Pit Thermal Energy Storage: 2024 Measurement Report,” Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Report, 2025. doi: 10.11581/5725831c-a697-4211-a049-34bc71025a50.



SUPPORTED BY
**novo nordisk
fonden**



ISBN 978-87-976647-0-4