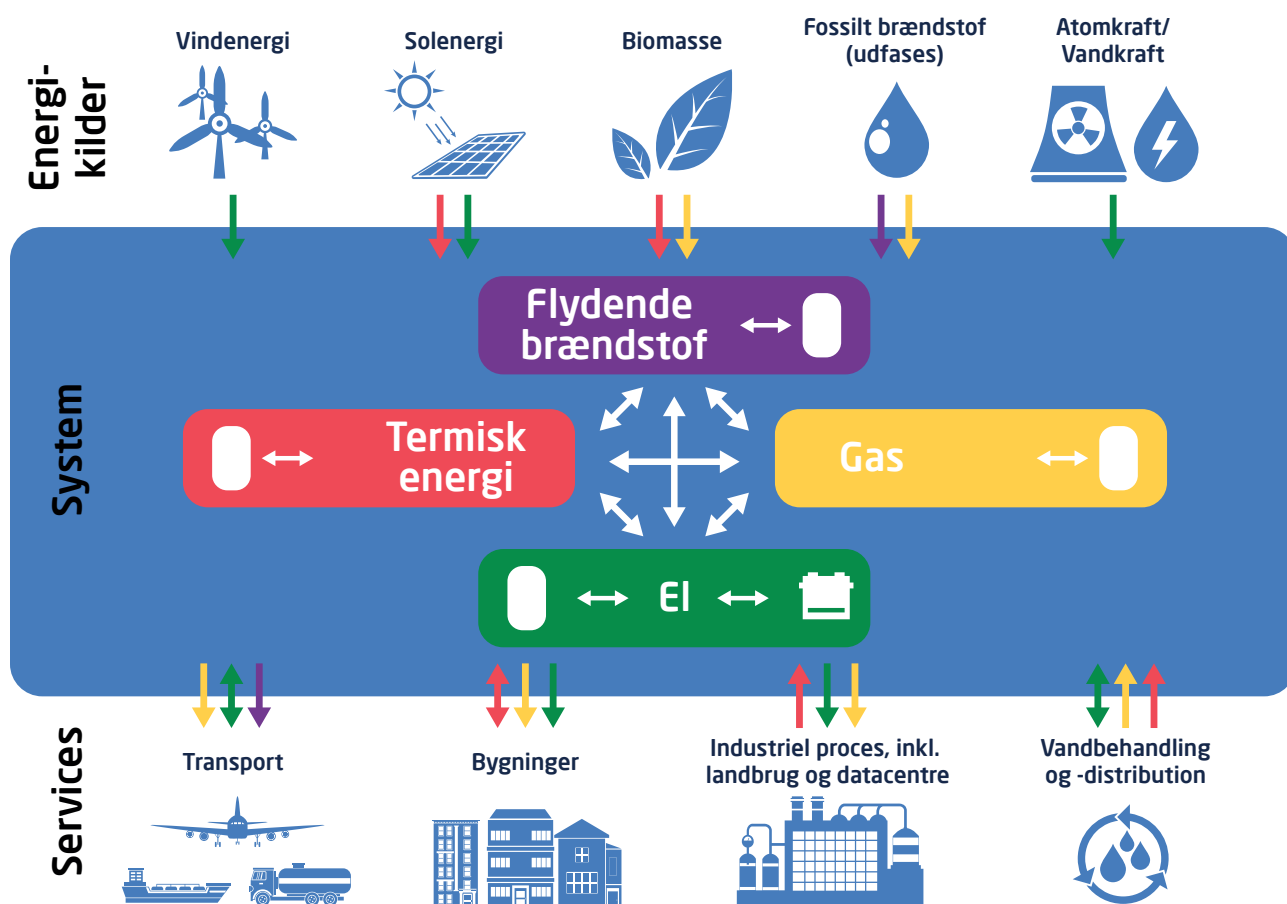


DTU Sektorudviklingsrapport

Smarte Energisystemer er vejen frem



DTU Sektorkoblingsmodellen

Danmarks mål om 70 % CO₂-reduktion i 2030 ift. 1990 niveau kan kun nås ved hjælp af digitalisering og integration mellem forskellige energiformer. Samtidig skal vi udnytte potentialet for CO₂-reduktion i sektorer, der normalt ikke tænkes som en del af energisektoren.

INTERVIEWEDE VIRKSOMHEDER, OFFENTLIGE INSTITUTIONER OG MYNDIGHEDER OG BRANCEFORENINGER

ICT virksomheder:



Energiteknologivirksomheder:



WattsUp Power

Byggeri:



Rådgivende ingeniørvirksomheder:



Offentlige institutioner og myndigheder:



Brancheforeninger:



Disclaimer: Personer i virksomheder, på universiteter og offentlige institutioner og myndigheder opstillet ovenfor er interviewet, men kan ikke nødvendigvis tages til indtægt for indholdet af rapporten. Henvendelser vedr. rapporten kan rettes til chefkonsulent Mads H. Odgaard, maod@dtu.dk.



Danmark fejrer 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen

H.C. Ørsted opdagede sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme 1820. Der kan tegnes en lige linje fra den naturvidenskabelige erkendelse over teknisk videnskab og industriel foretagelse til en fundamental og positiv forandring af vores samfund.

I dag er sammenhængen mellem elektricitet og mekanisk kraft stadig et af forskernes store fokusområder. Blandt nutidens centrale udfordringer er f.eks. at udvikle bedre batterier, så vi kan lagre den vind-elektricitet, vi producerer, i længere tid, eller producere CO₂-neutral energi i endnu større skala.

H.C. Ørsted er en repræsentant for det nysgerrige menneske og en rollemodel for nutiden. Han viser, at man kan forandre verden, hvis man er nysgerrig på naturen. Han interesserede sig for naturens egenskaber og udførte et eksperiment, hvor han så noget, han ikke forventede. Han undersøgte det uventede fænomen nærmere og beskrev det på en sådan måde, at andre kunne reproducere hans eksperiment. Dermed kom opdagelsen ud af hans laboratorium og påvirkede hele den videnskabelige verden.

Elektromagnetismen udgør det videnskabelige grundlag for en stor del af elektroteknologien, især for mikrobølgeteknologien.

Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen gjorde det muligt senere i 1800-tallet at påvise de elektromagnetiske bølger, der i dag omgiver os og udnyttes på et utal af måder til trådløs kommunikation i bl.a. mobiltelefoner, satellitter, medicinsk udstyr, sikkerhedssystemer og radar. Teknologier der i dag fortsat forskes i og som danner grundlag for en lang række af DTU's styrkepositioner.

FORORD

Smarte Energisystemer er vejen frem

Med denne rapport præsenterer DTU en kortlægning af forskningsbehov og rammebetingelser, som kan medvirke til at indfri potentialet i Smarte Energisystemer. Arbejdet har afdækket, at forskning i Smarte Energisystemer omsat til forretningsudvikling kan yde store bidrag til reduktion i CO₂-udledningen.

Kortlægningen er afrundet med forslag til forskningsbehov inden for udvalgte områder samt et sæt anbefalinger, der kan bidrage til at accelerere udvikling og anvendelse af nye teknologier og rammebetingelser. De seks brancheorganisationer Dansk Byggeri, Dansk Energi, Dansk Fjernvarme, Dansk Gasteknisk Center a/s, DI Energi og FRI har bidraget med viden og input til arbejdet.

Projektet er et godt input til alle aktører i energisektoren og de øvrige sektorer. Oplagte fokusområder for indsatsen er transport, bygninger, industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution. Disse sektorer skal fremadrettet indgå i Smarte Energisystemer og være med til at styrke samarbejdet, så vi kan accelerere forskning og innovation på området. Det vil være helt nødvendigt for at løse de udfordringer, som verdensmålene nr. "7. Bæredygtig energi", "11. Bæredygtige byer og lokalsamfund" og "12. Ansvarlig forbrug og produktion" er udtryk for. Det er vores håb, at rapporten kan være med til at sikre Danmark en plads helt fremme i førerfeltet i mange år endnu.

God læselyst!

Direktør Michael H. Nielsen, Dansk Byggeri

Forsknings- og teknologidirektør
Jørgen S. Christensen, Dansk Energi

Vicedirektør Kim Behnke, Dansk Fjernvarme

Vicedirektør Jan K. Jensen,
Dansk Gasteknisk Center a/s

Branchedirektør Troels Ranis, DI Energi

Adm dir. Henrik Garver, FRI

Koncerndirektør Marianne Thellersen, DTU

Sådan har vi gjort

Hovedformålet med sektorudviklingsprojektet er at fremme forretningsudvikling af Smarte Energisystemer og derigennem accelerere den grønne omstilling i Danmark og internationalt baseret på forskningsbaseret viden om 5 hovedtemaer: Digitalisering i energisystemet, fleksibilitet og integration af energisystemer, robusthed af energisystemer, tilpasning af rammebetingelser og udvikling af innovationssystemet. Dermed udvikles grundlaget for en ny national styrkeposition inden for Smarte Energisystemer.

Arbejdet har givet indblik i en lang række udfordringer og muligheder forbundet med at øge vind- og solenergis andel af energiforsyningen og -forbruget. Sammen med virksomheder, offentlige institutioner og myndigheder og brancheforeninger i ind- og udland har vi kortlagt, hvilken forskning og hvilke rammebetingelser som kan bidrage til at skabe løsninger, der kan bidrage til at nå 2030-målene for reduktion af CO₂-udledning.

Projektet er gennemført i perioden maj 2018 – december 2019 med deltagelse af eksperter fra DTU Byg, DTU Compute, DTU Elektro, DTU Energi, DTU Fotonik, DTU Fysik, DTU Management, DTU Mekanik, DTU Vind og DTU UNEP. Dansk Byggeri, Dansk Energi, Dansk Fjernvarme, Dansk Gasteknisk Center a/s, DI Energi og FRI har bidraget med viden og input til arbejdet. DTU Compute, DTU Elektro og DTU Management og Afdeling for Forskning, Rådgivning og Innovation på DTU har været tovholdere. DTU er afsender af rapporten.

Anbefalingerne i rapporten reflekterer dialogen med aktører fra sektoren og på tværs af de involverede DTU institutter.

Sektorudvikling

Sektorudviklingsprojekter er et af de værktøjer, som DTU bruger til at samarbejde med erhvervsliv og myndigheder. Målet med projekterne er at styrke teknologiintensive branchers konkurrenceevne ved at skabe overblik og handlingsplaner for udvikling og anvendelse af nye teknologier.

Metoden går ud på at:

- Kortlægge og analysere teknologianvendelsen i branchen, baseret på interviews og workshops
- Identificere flaskehalse og udviklingsbehov både hos virksomheder, myndigheder og DTU
- Udvikle anbefalinger til forskning og rammebetingelser

Sektorudviklingsprojekterne bliver skabt i et forum bestående af repræsentanter for virksomheder, myndigheder, brancheforeninger i ind- og udland og af forskere fra DTU.

Indhold

Indledning	Side 8
Resumé	Side 9
Kapitel 1 Smarte Energisystemer er vejen frem	Side 14
Kapitel 2 Danmark var tidligt ude med Smarte Energisystemer	Side 20
Kapitel 3 Grundmodel for Smarte Energisystemer & grøn omstilling, erhvervsudvikling og forbrugerfokus	Side 31
Kapitel 4 Flexibilitet, integration og optimering/automation	Side 36
Kapitel 5 Teknologier, systemarkitektur, styring og digitalisering	Side 40
Kapitel 6 Rammebetingelser	Side 46
Kapitel 7 Cybersikkerhed og robusthed	Side 49
Kapitel 8 Nye modeller til optimering af investeringer og drift	Side 53
Kapitel 9 Integration af konverterings- og lagringsteknologier	Side 54
Kapitel 10 Sektorkoblingsmodellen og 6 eksempler på mobilisering af fleksibilitet og til at reducere CO2-udledning	Side 56
Kapitel 11 Anbefalinger	Side 77
Appendiks 1-5	Side 84

Indledning

I Kapitel 1 beskrives udfordringen om fortsat at øge andelen af vind- og solenergi i energisystemet, når der mere end tidligere skal mobilisere fleksibilitet indenlands, fordi man mindre end hidtil kan forlade sig på internationale transmissionsforbindelser. Der redegøres for, hvordan udfordringen kan imødegås vha. digitalisering i styringen af fremtidens decentrale energisystem på den korte tidshorisont og vha. andre teknologier som elektrificering, lagring og konvertering på den lange horisont. Elproduktion vil være driveren for udviklingen og indtage en gradvist mere og mere central rolle. Udviklingen er betinget af ændringer til rammebetingelser som afgifter og tariffer for energi. Der redegøres for en række store former for samfundsøkonomisk nytteværdi af Smarte Energisystemer. Det sandsynliggøres, at Danmarks førerposition på området er udfordret, så der skal sættes mere på forskning, både målrettet at løfte udfordringer i Danmark og i andre lande.

Kapitel 2 redegør for historik og for international relevans af indsatsen i Danmark. Desuden for, hvordan sektoren i Danmark har behov for afklaring med hensyn til kombinationer af udfordringer, teknologier og rammebetingelser og for konkurrenceevnen.

I Kapitel 3-7 udfoldes en grundmodel for Smarte Energisystemer over fire niveauer. Niveau 1 udgøres af de målsætninger, som systemet skal leve op til. Det næste niveau beskriver de virkemidler, der skal muliggøre at opfylde målsætningerne. Det tredje niveau består af understøttende teknologier, systemarkitektur og -styring, digitalisering og rammebetingelser. Endelig er der det fjerde niveau, som beskriver, hvordan systemet skal håndtere hensyn til cybersikkerhed samt generel robusthed.

I Kapitel 8 bliver der motiveret et behov for nye modeller for optimering af investeringer og drift af fremtidige Smarte Energisystemer. Der redegøres for, hvordan modellerne skal integrere flere sektorer end hidtil, hvilket skaber udfordringer for opretholdelsen af balance og modstandsdygtighed.

I Kapitel 9 motiveres forskning i integration af konverterings- og lagringsteknologier i Smarte Energisystemer. Baggrunden er, at et Smart Energisystem, der er bæredygtigt med hensyn til såvel udledninger, forbrug af ressourcer samt i økonomisk forstand, kræver markante forbedringer af de indgående konverterings- og lagringsteknologier.

I Kapitel 10 er der redegjort for DTU Sektorkoblingsmodellen både udtrykt som et fysisk system med tre niveauer (energikilder, system og services) og i form af en række øvrige niveauer, som skal modnes, for at det fulde potentiale i det fremtidige Smarte Energisystem kan udnyttes. I seks cases udfoldes status inden for hvert af niveauerne og graden af modenhed inden for en række parametre og deres bidrag til fleksibilitet. Der redegøres også for potentialet for CO₂-reduktion, tidshorisont for effekt og forskningsbehov i hver af de 6 cases og for det samlede potentiale for CO₂-reduktion i de seks cases målt både i PJ, mio. tons CO₂ og i ca. antal %-point.

I Kapitel 1 og 3-10 er formuleret forskningsspørgsmål, der såfremt de besvares, kan medvirke til at udvikle Smarte Energisystemer.

I det afsluttende Kapitel 11 redegøres for anbefalinger for forskning og rammebetingelser

Resumé

Smarte Energisystemer er vejen frem

Danmarks mål om 70 % CO₂-reduktion i 2030 ift. 1990 niveau kan kun nås ved hjælp af digitalisering og integration mellem forskellige energiformer. Samtidig skal vi udnytte potentialet for CO₂-reduktion i sektorer, der normalt ikke tænkes som en del af energisektoren.

Danmarks mål om 70 % CO₂-reduktion i 2030 ift. 1990 niveau kan kun nås ved hjælp af digitalisering og integration mellem forskellige energiformer. Samtidig skal vi udnytte potentialet for CO₂-reduktion i sektorer, der normalt ikke tænkes som en del af energisektoren.

Lande og industrier, som formår at skabe sammenhængende og fleksible energisystemer, vil lykkes bedst og billigst med den grønne omstilling og med erhvervsudvikling, eksport og jobskabelse. Udfordringerne og mulighederne er særlig store for Danmark, idet vi har meget ambitiøse mål for vedvarende energi, specielt hvad angår teknologier med en variabel energiproduktion såsom vindkraft og solceller.

Vindkraft, solenergi og biomasse og andre vedvarende energikilder er allerede konkurrencedygtige i forhold til fossil energi eller tæt på at være det. Disse teknologier vil udgøre rygraden i fremtidens energisystem. Men produktionen fra vindkraft og solenergi varierer i takt med skift i vejret. Således kommer energisystemet i de kommende år til at stå over for en stor dobbelt udfordring. For i takt med at energisystemet i stigende grad bliver baseret på sol- og vindenergi, får vi større behov for balancering. Tidligere har vi ved at skrue op og ned for produktionen på kraftvarmeværkerne og ved at udnytte reserver kunnet håndtere denne balancering. Imidlertid udfases kraftvarmeværkerne, og udlandet vil selv anvende reserverne til at balancere deres energisystemer gradvist som disse energisystemer bliver mere fossil-frie. Så fremover skal balancen opretholdes ved at flytte fokus fra de tidligere centrale enheder til alle de enheder ude i samfundet, som kan give fleksibilitet. Derfor bliver en del af udfordringen at anvende analytics, kunstig intelligens og IoT til at sørge for, at der er balance

mellem produktion og forbrug gennem en langt større fleksibilitet i forbrugsleddet. For det danske energisystem betyder det fokus på fuldt elektrificeret vejtransport, bygninger, fjernvarmesystemer, gas-systemet, kølesystemet og rensningsanlæg.

Udtrykket Smarte Energisystemer dækker over et omkostningseffektivt, bæredygtigt og sikkert energisystem, hvor vedvarende energiproduktion, infrastrukturer og energiforbrug er integreret og koordineret gennem energitjenester, aktive brugere og teknologier. I denne rapport behandles dog kun digitale teknologier. Vigtige aktører på området er elselskaberne og andre forsyningsvirksomheder samt en række andre virksomheder, herunder vindmølleproducenter, producenter af solenergi-anlæg samt deres leverandører. Desuden er en række IT-virksomheder aktive på området.

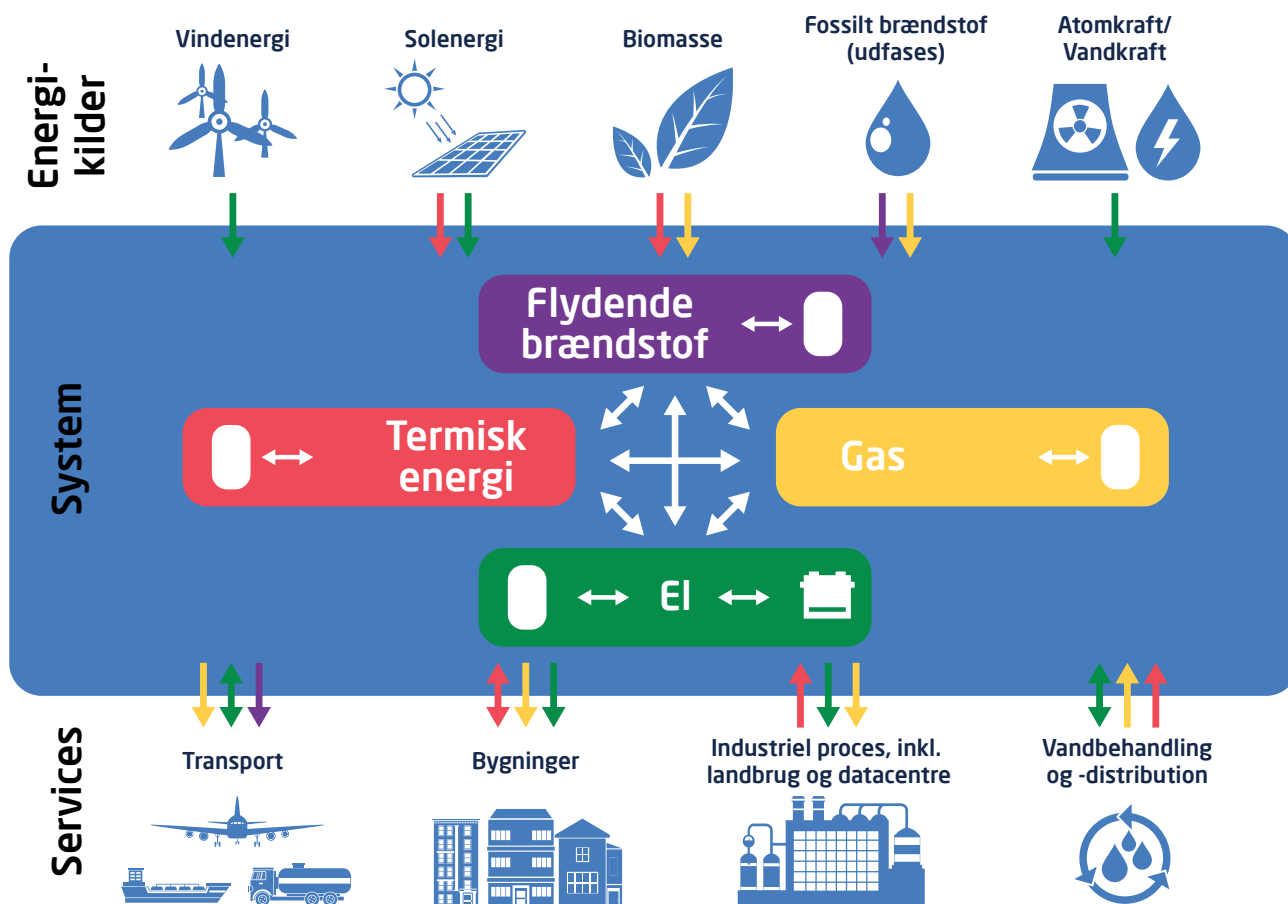
Smarte Energisystemer er en forudsætning for udvikling af bæredygtige energisystemer, så verden kan nå målene om at begrænse udledningerne af drivhusgasser og beskytte klimaet. Tre af FN's 17 verdensmål, "7. Bæredygtig energi", "11. Bæredygtige byer og lokalsamfund" og "12. Ansvarlig forbrug og produktion" adresserer omstilling af energisystemet. Udvikling af et Smart Energisystem er således en afgørende global agenda, som kun vil blive yderligere efterspurgt i mange år frem.

Frem til 2030 forventes verdens lande at øge investeringerne i energiløsninger til 13.500 milliarder US-dollars for at leve op til deres forpligtelser i Paris-aftalen, der skal beskytte klimaet. Yderligere 8.000 mia. US-dollars forventes at blive investeret inden for distribueret intelligens, dataanalyse og kommunikationsteknologier.

Sektorkoblingsmodellen

I sektorudviklingsprojektet er der udviklet en DTU Sektorkoblingsmodel (se Figur 1), der tager udgangspunkt i, at udviklingen af Smarte Energisystemer skal tage højde for flere niveauer. Det fremtidige energisystem vil i høj grad være baseret på fluktuerende

energikilder som vind og sol. Målet er dels en CO₂-reduktion og samtidig et mål om 100 % vedvarende energi. Der vil være forskellige løsninger afhængig af geografi og nuværende energisystem. Modellen illustrerer det globale energisystem.



Figur 1. DTU Sektorkoblingsmodellen.

Vejen mod en 70 % reduktion af CO₂-udledning i Danmark

For at opnå målsætningen om en 70 % reduktion af CO₂-udledning i Danmark i 2030 skal der ske en markant optrapning af indsatsen. I dag har vi reduceret CO₂-udledningen med 32 % ift. 1990 niveau. Dette svarer til 1,1 % per år. Med en målsætning på 70 % reduktion af CO₂-udledningen i 2030 skal vi fremover reducere CO₂-udledningen med 3,3 % per år. Vi skal således gennemføre den næste etape af den grønne omstilling 3 gange hurtigere, end vi har gjort indtil nu. Omstillingen skal laves, så Danmark kan drage mest mulig fordel af de ambitiøse politiske mål ved at fokusere på fleksibilitet baseret på digitalisering og

kunstig intelligens som alternativ til investeringer i kabler og energianlæg. Dette skal ske samtidig med, at eksportvirksomhederne udvikler energieffektive og -fleksible løsninger på forbrugersiden.

Realisering af 2030 målet vil kræve en øget direkte elektrificering af områder som opvarmning, transport og industri. Men den direkte elektrificering er dog ikke i sig selv tilstrækkelig til at nå 2030-målet. Yderligere reduktioner kan ske gennem brug af VE-el til Power-to-X.¹ Med de rette rammebetingelser vurderes det, at Power-to-X kan udgøre et fleksibelt energiforbrug,

¹Power-to-X = Omdannelse af grøn strøm til brint og herfra eventuelt videre til grøn ammoniak, grøn metanol eller lignende.

som vil kunne understøtte den nødvendige storskala investering i sol og specielt i havvind frem mod 2035.

Ifølge de beregninger, som er udført i projektet, vil man inden for seks områder, der alle tegner sig for betydelige andele af energiforbruget, kunne opnå besparelser på 80-95 % i udslippene af CO₂ (Se Figur 2). De seks områder er:

1. Fuldt elektrificeret vejtransport
2. Sektorkobling mellem el og fjernvarme
3. Bygningsmasse
4. Elektrificering og integration af industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre)
5. Sektorkobling mellem el og gas, med udvikling af brintteknologier, Power-to-X og produktion af både flydende og gasformige brændstoffer.
6. Distribution og behandling af vand.

Case	Potentiel PJ reduktion	Potentiel mio. tons CO ₂ reduktion	Potentiel reduktion relativt ift. 2030 basisfremskrivning (%)	Tidshorisont for effekt	Forskningsbehov
Case A - Fuldt elektrificeret vejtransport	120	11.2	93%	0-15 år	Ladeteknologi, brugeradfærd, netbelastning, analytics, intelligent ladeinfrastruktur, flådedyringsværktøjer, smartgrid kommunikation. fleksibilitetsydelse til netelskaber, service-baserede forretningsmodeller.
Case B - Sektorkobling mellem el og fjernvarme	21	2.5	89%	0-10 år	Behov og potentiale for fleksibilitet, dataplatforme, styre- og kontrolsystemer, fleksibilitetsmarked og produkter, analyse af krav til regulering og af værdien af fleksibilitet.
Case C - Bygningsmasse	25	1.8	92%	0-25 år	Karakterisering af bygningers fleksibilitet, regulering mhp. at fremme fleksibilitet, styring af varme- og kølesystemer, materialer med bedre termiske egenskaber, opvarmningsløsninger som øger fleksibiliteten, personaliseret indeklima, energimærkningsordning metoder til energiforbedringsindsatser, principper for design af bygninger og byer mhp. grøn omstilling.
Case D - Elektrificering og integration af industriens processer	20	3	73%	0-25 år	Potentiale for elektrificering, tekniske løsninger til alle temperaturniveauer, kapaciteter, effektive varmepumpeanlæg til alle temperaturer, varmepumper som anvender naturlige og andre ikke-miljøskadelige kølemidler, hybridløsninger, digitalisering, forsynings-sikkerhed og kapacitet i elsystemet, løsninger som både giver høj fleksibilitet, produktivitet og produkt-kvalitet, industrisektoren i energisystemanalyser.
Case E - Sektorkobling mellem el og gas	-54	3.5	64%	10-25 år	Udvikling af økonomisk attraktiv elektrolyseteknologi, termisk forgasning/pyrolyse, biologiske anlæg/fermentering, gasser der er de mest fordelagtige energibærere, værdien af fleksibilitet, tekno-økonomisk benchmarking af forskellige system layouts og teknologivalg, regulerbarhed for de enkelte konverteringsteknologier, fleksibilitet ved at sammenkoble power2gas med andre lagringsteknologier.
Case F - Vanddistribution og -behandling	(fleksibilitets-effekt)	(fleksibilitets-effekt)	(fleksibilitetseffekt)	0-25 år	Drikkevand: Pumpning til vandtårn, muligheder ift. afsaltning af havvand. Spildevand: Forskellige typer rensningsanlægs fleksibilitet, potentiale for smart styring af pumpestationer, spildevandsafgift/elafgift i forhold til bæredygtig styring af spildevandssystemer.
I alt - Alle 6 cases	142	22	83% for cases, (58% i alt)	-	

Figur 2. CO₂-reduktion potentialet i 6 Smarte Energisystem cases, tidshorisont for effekt samt forskningsbehov.² Beregningerne er baseret på Energistyrelsens basisfremskrivninger, og der er tale om et overslag.

² Bemærk at biomasse er regnet CO₂-neutral, som antaget i UN-konventionen. I realiteten er biomasse dog ikke altid CO₂-neutral.

Sektorkobling og Smarte Energisystemer kan facilitere et potentiale for CO₂-reduktioner. Det totale potentiale inden for de seks cases estimeres til 22 millioner tons CO₂. Til sammenligning mangler vi at reducere udledningen med 29,4 millioner tons ift. den udledning af CO₂, der var i 2017, hvis vi skal nå målet om en 70 % reduktion i 2030. Med andre ord er det bestemt ikke kun marginale CO₂-reduktioner, der står på spil. Analyser gennemført i sektorudviklingsprojektet viser, at modenheden med hensyn til at realisere potentialerne er varierende, og at casene har en implementeringstid på mellem 0-10 og 0-25 år. Vi skal derfor i gang nu og her med disse omstillinger, hvis vi skal opnå væsentlige reduktioner i CO₂-udledninger til 2030. Samtidig er det en forudsætning, at man parallelt satser på Smarte Energisystemer og på de nødvendige tekniske og strukturelle forandringer i en række sektorer i samfundet.

International førerposition under pres

Når Danmark roser sig af en international førerposition inden for vedvarende energi, er der noget om snakken. For som land har vi gjort det godt over de seneste årtier. I forhold til niveauet i 1990, som er basisåret i de årlige internationale klimaforhandlinger, er Danmark det land, der har været i stand til at omstille sig mest fra fossile brændsler til vedvarende energikilder. Men der er ikke tale om én lang solstrålehistorie. Siden 2010 er de hjemlige investeringer i forskning og udvikling inden for vedvarende energi imidlertid stagneret. I 2016 og 2017 blev der tilmed skåret kraftigt ned i de offentlige investeringer i energiforskning (se Appendiks 3). Det er særligt udfordrende at opnå finansiering af forskning i selve systemaspektet og af forskning i enabler af Smarte Energisystemer. Det er velkendt, at manglende forskningsinvesteringer og rammebetingelser har konsekvenser for en branches forskning, innovation, beskæftigelse og eksport. Ikke lige med det samme. Men efter nogle år. Det vil sige nu, hvor gennemslagskraften af forskning er faldende (se Appendiks 3), og kvaliteten af rammebetingelser giver Danmark en placering nogenlunde midt i feltet af de industrilande, vi normalt sammenligner os med. Samme tendens ser man for branchens eksport, som begyndte at falde i 2014 (se Appendiks 3). Ej heller er denne udvikling befordrende for uddannelse af de ingeniører, som kan og skal medvirke til, at vi når 2030 målene for CO₂-reduktion.

Alligevel er der håb om, at Danmark kan holde sig helt i front. Danmarks tidlige satsning på vindenergi har

nemlig betydet, at danske virksomheder og offentlige forskningsinstitutioner i dag besidder en unik viden om systemer, der kan håndtere udsving i produktion og forbrug af energi. Fx identificerede EU-kommisions Joint Research Center i 2014 DTU som den organisation i Europa med flest F&U-aktiviteter inden for området. Og Deloitte identificerede i 2017 intelligente energiløsninger som det energiteknologiske område med det største markedspotentiale for dansk industri. Så Danmark er i dag langt fremme inden for Smarte Energisystemer.

Der er da også en række af lande, især de som er langt med omstilling af energisystemet, som har højt fokus på udvikling af disse nye løsninger, og ser det som en erhvervsmæssig mulighed. Danmark er dog i en pionerposition og spiller en væsentlig rolle internationalt i forhold til forskning, udvikling og demonstration af intelligente energiløsninger.

Der har været tradition for internationalt samarbejde omkring løsningerne, bl.a. aktualiseret af det sammenhængende transmissionsnet for elektricitet og gas, markeder på tværs af landegrænser og de internationale aktiviteter i EU's F&U-programmer. Der er fortsat mulighed for at udbygge de internationale samarbejder på alle disse fronter, herunder stærkere regionale markeder og markedskoblinger, som muliggør udveksling af energiudbydere, fleksibilitet og sektorkobling på tværs af landegrænser.

Det er vigtigt, at dette internationale fokus forsættes og styrkes. Dels er det centralt for en omkostningseffektiv udviklingsindsats, at den sker i et internationalt samarbejde, og dels er det vigtigt for et efterfølgende effektivt marked, hvor de enkelte deløsninger ikke skal skræddersyes til hvert enkelt marked (det er ikke hensigtsmæssigt at udvikle lokale danske løsninger, som ikke kan lokaliseres til andre lande).

Anbefalinger for forskning og udvikling

Den helt overordnede anbefaling er, at aktørerne i energisektoren, innovative digitale virksomheder og universiteter går sammen om flere fælles og meget større strategiske satsninger for udvikling af sammenhængende Smarte Energisystemer i Danmark og internationalt. Specielt er det vigtigt at erkende, at fleksibiliteten fremadrettet i øget grad skal flyttes fra produktionen til forbruget, og derfor er oplagte fokusområder transport, bygninger og industrielle processer i industri (inkl. landbrug og datacentre) og i vand-

behandling og distribution. Der bør forskes i aspekter vedrørende integration af energiteknologier i Smarte Energisystemer, ud over forskningen i de enkelte lagrings- og konverteringsteknologier. Satsningerne kan tænkes gennemført i de nye planlagte testzoner, som skal give mulighed for test af nye og alternative rammebetingelser.

Der er fokuseret på forskning og udvikling, der skal udføres i dag, og som kan bidrage til løsninger i 2030 samt lægge fundamentet for løsningerne i 2050. Det er i denne sammenhæng vigtigt at påpege, at selv den mere kortsigtede forskning skal rumme et 2050-perspektiv, således at de kortsigtede investeringer kommer til at flugte med behovene efter 2030 frem mod 2050.

Anbefalingerne til forskning og udvikling er:

- 1) *Der skal forskes i udvikling af platforme til sektorkobling*
- 2) *Der skal forskes i udvikling af metoder og software til at mobilisere fleksibilitet, herunder fleksibilitetsprodukter*
- 3) *Der skal forskes i afgiftsstrukturer, der understøtter fleksibilitet og effektivitet samt er fair for forbrugerne*
- 4) *Der skal forskes i tarifstrukturer, der på en og samme tid understøtter fleksibilitet og sikrer økonomisk efficiens og stabilitet i forsyningsnettet*
- 5) *Der skal forskes i forbruger-fokuserede løsninger og nye forretningsmodeller, der skaber involvering og værdiskabelse for kunderne*
- 6) *Der skal forskes i sikring af robusthed af decentraliserede og internationaliserede Smarte Energisystemer*
- 7) *Der skal forskes i udvikling af nye modeller til optimering af investeringer og drift specifikt i en Smart Energisystem sammenhæng og i opgørelse af samfundsøkonomisk nytteværdi*
- 8) *Gør adgangen til data bedre og muliggør innovation*
- 9) *Der skal forskes i aspekter vedrørende integration af energiteknologier i Smarte Energisystemer*

Anbefalingerne om rammebetingelser og uddannelse, test, demonstration og innovation er:

- 10) *Bedre rammebetingelser for forsyningsselskaberne*
- 11) *Behov for opmærksomhed om grøn omstilling i andre lande*
- 12) *Efteruddannelse og opmærksomhed om kombination af fagligheder*
- 13) *Test- og demonstrationsprojekter, lokaliserede behov og forretningsmodeller*
- 14) *Finansiering af forskning i selve systemaspektet og i enablere af Smarte Energisystemer*

Kapitel 1

Global tendens:

Smarte Energisystemer er vejen frem



Lande og industrier, som formår at skabe sammenhængende og fleksible energisystemer, vil lykkes bedst og billigst med den grønne omstilling og med erhvervsudvikling, eksport og jobskabelse. Udfordringerne og mulighederne er særlig store for Danmark, idet vi har meget ambitiøse mål for vedvarende energi, specielt hvad angår teknologier med en variabel energiproduktion såsom vindkraft og solceller. Derfor er vi nødsaget til at udnytte digitalisering i styringen af fremtidens decentrale energisystem. Samtidig skal vi forbedre samspillet mellem energisektoren og en række andre sektorer som transport, bygninger og industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution. Her vil brug af data og digitalisering komme til at spille en nøglerolle.

Vindkraft, solenergi og biomasse og andre vedvarende energikilder er allerede konkurrencedygtige i forhold til fossil energi eller tæt på at være det. Disse teknologier vil udgøre rygraden i fremtidens energisystem. Men produktionen fra vindkraft og solenergi varierer i takt med skift i vejret. Således kommer energisystemet i de kommende år til at stå over for en stor dobbelt udfordring. For i takt med at energisystemet i stigende grad bliver baseret på sol- og vindenergi, får vi større behov for balancering. Tidligere har vi ved at skrue op og ned for produktionen på kraftvarmeværkerne og ved at udnytte reserver kunnet håndtere denne balancering. Imidlertid udfases kraftvarmeværkerne, og udlandet vil selv anvende reserverne til at balancere deres energisystemer gradvist som disse energisystemer bliver mere fossil-frie. Så fremover skal balancen opretholdes ved at flytte fokus fra de tidligere centrale enheder til alle de enheder ude i samfundet, som kan give fleksibilitet. Derfor bliver en del af udfordringen at anvende analytics, kunstig intelligens og IoT til at sørge for, at der er balance mellem produktion og forbrug gennem en langt større fleksibilitet i forbrugsleddet. For det danske energisystem betyder det fokus på fuldt elektrificeret vejtransport, bygninger, fjernvarmesystemer, gassystemet, kølesystemet og rensningsanlæg.

Smarte Energisystemer

Udtrykket Smarte Energisystemer dækker over et omkostningseffektivt, bæredygtigt og sikkert energisystem, hvor vedvarende energiproduktion, infrastrukturer og energiforbrug er integreret og koordineret gennem energitjenester, aktive brugere og teknologier.³ I denne rapport behandles dog kun digitale teknologier. Vigtige aktører på området er el-selskaberne og andre forsyningsvirksomheder samt en række andre virksomheder, herunder vindmølleproducenter, producenter af solenergi-anlæg samt deres leverandører. Desuden er en række IT-virksomheder aktive på området.

Figur 3. Definition af Smarte Energisystemer.

Gennem de sidste 10-15 år har der været en smart-grid dagsorden, som har haft fokus på intelligente elsystemer blandt andet med henblik på at håndtere den øgede elektrificering herunder en effektiv integration af de overvejende el-baserede vedvarende energiteknologier.

³ Efter: Smart Energy Networks (2015): Vision for Smart Energy in Denmark. Research, development and demonstration.

Stor samfundsøkonomisk nytteværdi

Smarte Energisystemer er en forudsætning for udvikling af bæredygtige energisystemer, så verden kan nå målene om at begrænse udledningerne af drivhusgasser og beskytte klimaet. Ikke mindre end tre af FN's 17 verdensmål, "7. Bæredygtig energi", "11. Bæredygtige byer og lokalsamfund" og "12. Ansvarlig forbrug og produktion" adresserer omstilling af energisystemet.⁴ Udvikling af et Smart Energisystem er således en afgørende global agenda, som kun vil blive yderligere efterspurgt i mange år frem.

Udvalget bag Afgiftsrapporterne, Klimarådet, og Energikommissionen, samt regeringens efterfølgende energiudspil og den nye energipolitiske aftale for 2020 og frem understreger, at i takt med at sol- og vindkraft er blevet konkurrencedygtig og andelen af vedvarende energi i systemet er vokset, er den fremtidige hovedudfordring at sikre, at den vedvarende energi anvendes smart, når den er til rådighed.⁵ Ud over at være afgørende for beskyttelse af klimaet rummer området meget stor samfundsøkonomisk nytteværdi.

Ved at etablere koblede energisystemer gennem digitalisering, og eksempelvis big data analytics, kunstig intelligens, og cyber physical systems, vil der kunne skabes en omkostningseffektiv integration af den fluktuerende vedvarende elproduktion. Hermed bliver det muligt at opnå større andel af vedvarende energi med lavere kapacitetsomkostninger (mindre net-udbygning og mindre backup kapacitet).

CO₂-udledning og helbredsskadelige udledninger har betydelige samfundsøkonomiske omkostninger. Effektiv kontrol og reduktion af disse bl.a. gennem sensorer, filtre mv. skaber samfundsøkonomisk nytteværdi.

Smarte Energisystemer har også betydning for en bredere udnyttelse af overgange mellem energiformer og aktivering af de billigste lagringsteknologier, hvad enten de findes i centrale varmelagre, ekstern vandkraftlagring, fjernvarmesystemer, bygninger, batterier i personbiler, varevogne og lastbiler, eller som gasbaseret lagring. En portefølje af lagrings-

teknologier formodes at skabe lavere kapacitetsomkostninger i forhold til ensidig lagring i hver enkelt af energisektorerne.

Digitaliserede energisystemer vil også kunne danne grundlag for bedre kontrol, styring og fejlfinding i fremstillingsindustriens produktionsprocesser. Her skabes både værdi i form af reducerede energiomkostninger samt i mere kontinuerlig produktion (kontrol og overvågning) og fleksibilitet i driftsoptimering. Her kan skabes værdi i form af forbedring af konkurrenceevne generelt for fremstillingsindustrien, men også gennem eksportpotentiale for danske energiteknologier, der er udstyret med bedre styrings- og kontrolmuligheder. Besparelser kan også skabes gennem reduktion i proces- og produktionstider i fremstillingsindustrien.

Der indgår to grundlæggende elementer i den digitale omstilling af distributionsnettet. Det ene element er, at netvirksomhederne kan udnytte den eksisterende kapacitet i distributionsnettet bedre, da de ved at forbedre overvågningen af nettet kan tillade højere belastninger. Det andet er et sammenhængende system af målinger, prognoser og kommunikationssystemer mhp. at overvåge nettets belastninger og optimere udnyttelsesgraden.

Sammenfattende har Smarte Energisystemer samfundsøkonomisk nytteværdi på tre områder:

1. Realisering af miljømålsætninger med lavest mulige omkostninger
2. Effektivisering af industrielle produktionsprocesser, der frigør ressourcer til investeringer og andet forbrug, og som øger konkurrenceevnen af produktion
3. Velfærdsgevinster gennem øget produktudbud/ nye produkter, der øger valgfrihed og komfort for forbrugerne samt giver nye eksportmuligheder

⁴<https://sustainabledevelopment.un.org/>

⁵"Vision for Smart Energy in Denmark", The Partnership Smart Energy Networks, Lea Lohse and Per Nørgaard
Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet (2018): Energifaite.

Forskningsspørgsmål:

- Hvilke nye løsninger inden for Smarte Energisystemer kan bidrage markant til billigere og bredere anvendelse af vedvarende energiformer inden for energisystemet på tværs af el, varme, gas og transport?
- Hvordan kan Smarte Energisystemer bidrage til at øge produktiviteten i dansk industri?
- Hvordan kan vi sikre, at Smarte Energisystemer udnytter potentialet, så forbrugervelfærd kan øges via øget komfort og friere forbrugsvalg?

El-baseret produktion vil være dominerende

Hovedparten af væksten i vedvarende energi skete i 2018 ifølge International Energy Agency (IEA) inden for elproduktion. Solceller, vandkraft og vindkraft tegnede sig tilsammen for en tredjedel af denne elproduktion, mens bioenergi stod for resten. Vedvarende energi dækkede i 2018 næsten 45 % af væksten i verdens elproduktion. Samlet set bliver mere end 25 % af verdens elproduktion i dag dækket af vedvarende energikilder.

40 % af væksten i el fra vedvarende energikilder skete i Kina, mens Europa tegnede sig for 25 % af væksten. USA og Indien bidrog tilsammen med yderligere 13 %.

Solceller havde en markant fremgang på hele 31 % med stor vækst i såvel Kina og Indien som USA og Europa. Vindkraften voksede med 12 % i 2018 og bevarede dermed sin status som den næststørste vedvarende energikilde. Førstepladsen indehaves fortsat af vandkraft, som leverer ca. 60 % af verdens elproduktion fra fornybare energikilder, men til gengæld er i en rolig udvikling med en vækst på 3 % i 2018. Endelig voksede produktionen af el ud fra biomasse med 7 %.⁷

Også produktionen af biobrændstoffer til transport og opvarmning er i vækst, men er dog langt fra så betydelig som elproduktion ud fra vedvarende energikilder.

Integration af teknologier i Smarte Energisystemer

Balancering af den fluktuerende vedvarende energi er i det danske energisystem i vid udstrækning sket ved at udveksle energi med nabolandene. I takt med at vores naboer selv får mere vedvarende energi, er der behov for at supplere udlandsforbindelserne med indenlandsk fleksibilitet.

Styring og kontrol vha. digitalisering kan medvirke til at sikre balancering af energisystemet og forsynings-sikkerhed over den korte tidshorisont. Men mht. den lange tidshorisont skal styring og kontrol vha. digitalisering suppleres af andre teknologier som elektrificering, lagring og konvertering.

Så på denne baggrund er teknologier relevante for Smarte Energisystemer. Konkret gælder det inden for lagring af vedvarende energi. I dag er mulighederne for lagring uden betydelige tab beskedne. Hvis der sker afgørende gennembrud inden for lagring, kan det ændre situationen markant. Også teknologi, der effektivt kan konvertere strøm til gas (Power-to-Gas) eller andre energikilder, der kan lagres, kan spille afgørende ind på udviklingen. I denne forbindelse er det relevant med forskning i integration af lagring og konvertering i Smarte Energisystemer for at sikre fremtidens energisystem, ud over forskning i de individuelle teknologier, som også er nødvendig.

International relevans

Udvikling af et Smart Energisystem er en global udfordring og en global forskningsagenda. Muligheder for at optimere energisystemet og billiggøre omstillingen til vedvarende energi gennem intelligente energiløsninger er globalt anerkendt.

Der er da også en række af lande, især de som er langt med omstilling af energisystemet, som har høj fokus på udvikling af disse nye løsninger, og ser det som en erhvervsmæssig mulighed. Danmark er dog i en pionerposition og spiller en væsentlig rolle internationalt i forhold til forskning, udvikling og demonstration af intelligente energiløsninger.

Der har været tradition for internationalt samarbejde omkring løsningerne, bl.a. aktualiseret af det sammenhængende transmissionsnet for elektricitet og gas, markeder på tværs af landegrænser og de internationale aktiviteter i EU's F&U-programmer. Der er fortsat mulighed for at udbygge de internationale samarbejder på alle disse fronter, herunder stærkere regionale markeder og markedskoblinger, som muliggør udveksling af energiydelser, fleksibilitet og sektorkobling på tværs af landegrænser.

Det er vigtigt, at dette internationale fokus fortsættes og styrkes. Dels er det centralt for en omkostningseffektiv udviklingsindsats, at den sker i et internationalt samarbejde, og dels er det vigtigt for et efterfølgende effektivt marked, hvor de enkelte delløsninger ikke skal skræddersyes til hvert enkelt marked (det er ikke hensigtsmæssigt at udvikle lokale danske løsninger, som ikke kan lokaliseres til andre lande).

Man vil næppe komme uden om at de enkelte lande har særlige forhold bestemt af landets geografi, klimazone, regulatoriske rammer, organisering, erhvervsstruktur osv. som giver variationer i energisystemernes optimale design. Der er derfor en fare for, at et manglende internationalt udblik kan resultere i løsninger, der ikke er replicerbare. Det vil formentligt være tilfældet, at især systemløsningerne vil variere fra land til land. Men de delløsninger og komponenter, som indgår i systemet, kan agere i de forskellige regimer. Det er vigtigt, at dette holdes for øje i den fremtidige udvikling (se Appendix 2 for en kort redegørelse for bud på en forventet udvikling i specifikke lande).

⁷ Kilde: "Global Energy & CO2 Status Report 2018"; IEA.

⁸ Efter: Smart Energy Networks (2015): Vision for Smart Energy in Denmark. Research, development and demonstration.

Vedvarende energi er i vælten

Efter nogle mørke år i kølvandet på finanskrisen er verdensøkonomien igen kommet i omdrejninger. Det afspejler sig i voksende forbrug af energi. Ifølge International Energy Agency (IEA) vokser udslippene af drivhusgasser imidlertid mindre end væksten i energiforbruget. Det er et udtryk for, at den vedvarende energi vinder frem.

Traditionelt har der været en direkte sammenhæng, hvor økonomisk vækst har været lig med vækst i udslippene af drivhusgasser. Men politiske bestræbelser i en række lande sammen med teknologiske fremskridt inden for bæredygtige energiformer har betydet, at sammenhængen nu er brudt.

Mens verdensøkonomien voksede med 3,7 % i 2018, steg det samlede energiforbrug med 2,3 %. Udledningerne af drivhusgasser steg noget mindre, nemlig med 1,7 %. Ifølge IEA kan forskellen tilskrives den vedvarende energis fremmarch. Den vedvarende energi voksede med 4,0 % i 2018 og nåede dermed op på at dække ca. en fjerdedel af den øgede globale efterspørgsel efter energi.⁷

Smarte Energisystemer

Udtrykket Smarte Energisystemer dækker over et omkostningseffektivt, bæredygtigt og sikkert energisystem, hvor vedvarende energiproduktion, infrastrukturer og energiforbrug er integreret og koordineret gennem energitjenester, aktive brugere og teknologier.⁸ I denne rapport behandles dog kun digitale teknologier. Vigtige aktører på området er elselskaberne og andre forsyningsvirksomheder samt en række andre virksomheder, herunder vindmølleproducenter, producenter af solenergi-anlæg samt deres leverandører. Desuden er en række IT-virksomheder aktive på området.

Voksende investeringer i Smarte Energisystemer

Verdens samlede investeringer i energiteknologi i 2017 udgjorde 1.800 milliarder USD. Heraf blev 750 milliarder USD investeret i elsektoren. Knap 300 milliarder USD af investeringerne i elsektoren var til etablering af ny vedvarende produktion af strøm – primært vindenergi, solceller og vandkraft. Et tilsvarende beløb blev investeret i selve elnettet.

Tallene stammer fra rapporten "World Energy Investment 2018" fra OECD/IEA. Om Smarte Energisystemer siger rapporten:

"Investeringerne i teknologier, som er designet til at øge fleksibiliteten i el-systemerne og understøtte integrationen af vedvarende energikilder og nye typer af efterspørgsel, er stigende. Elselskaberne moderniserer elnettene dels gennem direkte investeringer, dels gennem opkøb af virksomheder, der er engageret i såkaldt Smart Grid teknologi, herunder intelligente elmålere, avanceret distributionsudstyr og opladestationer for elbiler."

To forståelser af "sektor"

Terminologien "sektor" bliver anvendt på to måder i rapporten. Dels om sektorudviklingsprojektet, dels om de sektorer (fx transportsektoren, bygningssektoren) som indgår i Smarte Energisystemer som middel til at mobilisere fleksibilitet.

Symbolforklaring

TSO = Transmission System Operator

DSO = Distribution System Operator

LCA = Life Cycle Assessment

Afgrænsning af sektorudviklingsprojektet om Smarte Energisystemer

Realiseringen af et bæredygtigt energisystem, der kan leve op til nationale og internationale udledningsreduktionsmålsætninger fordrer smart styring og større brug af tekniske løsninger, der muliggør kobling mellem de energiforbrugende sektorer (fx transport, bygninger og industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og distribution). Herved bliver det lettere at sikre stabil drift, og at produktion og forbrug matcher. Forbedringer af de indgående energikonverterings- og lagringsteknologier er desuden afgørende. Fokus i dette sektorudviklingsprojekt er på førstnævnte aspekt; smart styring. Projektet formulerer anbefalinger til forskning inden for dette område. Der er også brug for forskning i de primære underliggende energiteknologier, fx vindmøller, solceller, konverteringsteknologier som varmepumper og elektrolyse-anlæg samt lagringsteknologier (termisk såvel som kemisk lagring). Nærværende projekt formulerer ikke forskningsmål for de enkelte teknologier men adresserer aspekter vedrørende integration af disse i et intelligent energisystem.

Andre beslægtede temaer som fx: (1) Katalyseprocesser, (2) Materialer, (3) Bioenergi og (4) Udfordringer om grøn omstilling i landbruget har også relevans for forskning og udvikling af bæredygtige energisystemer. Men for at opnå en fokuseret rapport og begrænse ressourceforbruget i udredningsarbejdet omhandler sektorudviklingsprojektet ikke disse temaer.

Kapitel 2

Status for sektoren:

Danmark var tidligt ude med Smarte Energisystemer

Den høje andel af vindkraft har givet Danmark en førertrøje i forhold til integration af fluktuerende vedvarende energi i el-systemet. Denne høje andel og balancen er muliggjort bl.a. ved en udnyttelse af transmissionsforbindelser til udlandet og ved en udnyttelse af fjernvarmesystemerne i Danmark. Den kompetence er efterspurgt ude i verden. Imidlertid er sektoren samtidig udfordret af faldende hjemlige investeringer i forskning og innovation.

Balancering af energisystemerne er afgørende for at løfte andelen af vedvarende energiformer, så målene i den internationale klimaaftale, Paris-aftalen, kan nås. Ud over at være afgørende for beskyttelse af klimaet rummer området meget store forretningsmuligheder. Nøglen til at fastholde det igangværende danske erhvervseventyr er udvikling af Smarte Energisystemer. Det kræver forskning samt demonstrationsprojekter inden for områder som styring ved hjælp af digitalisering, fleksibilitet og integration, robusthed samt tilpasning af rammebetingelser. Samtidig er der behov for at skabe rammer for flere startup-virksomheder på feltet.

Derved kan energisektoren fortsat accelerere den grønne omstilling i Danmark og ikke mindst bidrage til at mindske CO₂-udledningerne internationalt.

Oliekriser gav startskuddet

De to internationale oliekriser i 1970'erne gav anledning til øget forskning i teknologi og systemer på energiområdet (se Figur 4). Naturligt nok var forsyningssikkerhed omdrejningspunktet. Selvom der blev forsket i vedvarende energiformer som vind og sol, fyldte integrationen af dem i det samlede energisystem meget lidt. Varmeforsyningsloven fra 1979 bidrog til, at udbredelsen af fjernvarme for alvor tog fart og blev en vigtig del af energisystemet.

I 1980'erne kom de første støtteordninger for opførelse af landvindmøller.

I løbet af 1990'erne kom klimaudfordringen på dagsordenen. Det gav for alvor fokus på at omstille energisystemet fra fossile til vedvarende energiformer. Vedtagelsen af afgifter på CO₂ var vigtige i den forbindelse. Vind- og solenergi vandt gradvist større indpas i det samlede energisystem, og de første støtteordninger til havmøller kom.

2000'erne stod i markedsudviklingens tegn. Det liberaliserede Nordpool el-marked blev etableret først i Norge, så i Sverige og Finland og til sidst i Danmark. For første gang kunne forbrugere modtage information om priser på energi, hvorved efterspørgslen i nogle tilfælde blev prisafhængig. Decentraliseringen af forsyningssektoren, som var påbegyndt i 1990'erne, blev nu udmøntet i en opsplitning af forsyningselskaberne. Parallelt med dette blev der taget de første skridt i retning af et integreret europæisk energisystem. Der blev bygget transmissionsforbindelser mellem nabolande, og EU vedtog målsætninger om at begrænse udslippene af CO₂ og fremme vedvarende energiformer. Udbygningen af landvindmøller steg kraftigt.

I såvel USA som EU blev der oprettet forskning i intelligente el-systemer - Smart Grids - fra midten af 00'erne. Begge steder var formålet at udvikle værktøjer til bedre styring af el-systemet baseret på markedsprincipper og data.

	1970'erne	1980'erne	1990'erne	2000'erne	2010'erne
Udfordring og teknologi	Den første oliekrise. Skift fra olie til kul.	Efterveer fra den anden oliekrise. Fokus på forsyningssikkerhed. Vedvarende energi på vej frem isæt vindkraft. Nej til a-kraft. Start på Naturgassystemet.	Fokus på klima-problemet. Vedvarende energi hastigt på vej frem. De første havmølle-parker. Decentralisering af forsyningssektoren – decentral kraftværker udbygges hastigt.	Liberalisering af elmarkedet – Danmark går med i NordPool. Fokus på effektivitet. Kraftig vækst i land-vindmøller. Udbygning af transmissions-forbindelser til nabolande. Smart Grids: Værktøjer til bedre styring af fysiske elektricitet systemer, der var baseret på markedsprincipper og data.	Uafhængig af fossile brændsler. Stor fokus på udledningen af drivhusgasser. Skift fra kul til biomasse i centrale. Stigende internationalisering af energimarkeder – NordPool udbygges til nordeuropæisk elmarked. Elektrificering griber om sig – vækst (om end lidt langsomt) i varmepumper, fuldt elektrificeret vejtransport lader vente på sig. Auktioner for havmølle-parker samt andre VE-teknologier. Smarte Energisystemer: Balancering af energisystem i lyset af større andel af vedvarende energi.
Regulering	Varmeforsyningsloven af 1979.	Planlægning af energisystemet. Støtte til opførelse af landvindmølle.	Støtte til havmøller. Afgifter på CO2.	Målsætninger på EU-niveau for CO2, VE mv (20-20-20). Opsplitning af forsyningsselskaber.	Stærke nationale og EU målsætninger for CO2, VE mv. Auktioner for VE.

Figur 4. Historik for Smarte Energisystemer

Markante danske demonstrationsprojekter

Udviklingstendenserne over de foregående årtier fortsatte i 2010'erne. Vægten blev blot lagt endnu mere på omstilling af energisystemet til vedvarende energiformer. Blandt andet blev kul gradvist udfaset til fordel for biomasse. Desuden blev el-systemet yderligere markedsbaseret med egentlige prissignaler til forbrugerne, så udbud og efterspørgsel kunne matches bedre. Samtidig blev de internationale energimarkeder udviklet yderligere, og målsætningerne for at begrænse udslippene af CO2 og øge andelen af vedvarende energi blev skærpet såvel nationalt som

i EU-regi. I 2011 var Danmark ifølge EU-Kommissionens rapport "Smart Grid projects in Europe" førende ved at indgå i 80 registrerede smart grid-projekter eller 22 % af alle smart grid-projekter i EU med et demonstrationsbudget på mindst 1 mio. euro, mens Tyskland, som lå nummer to på listen, var involveret i omkring 40 projekter.⁹

Med de vedvarende energiformers indtog i 2010'erne blev Smart Grid missionen udvidet til at balancere energisystemet. Samtidig begyndte man at arbejde

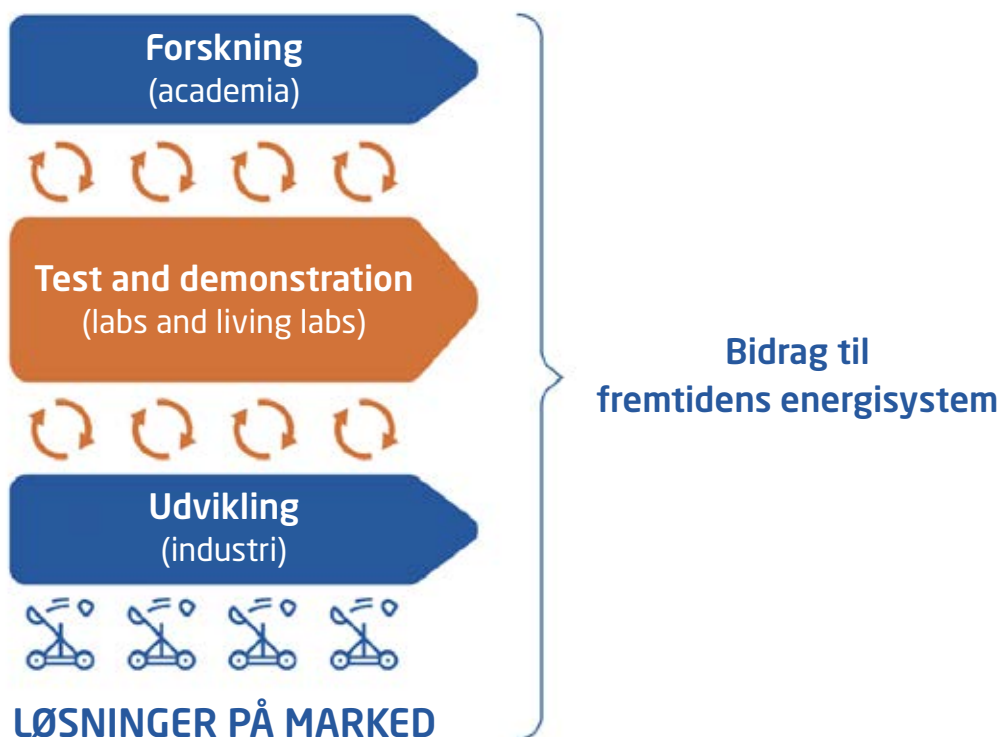
⁹ European Commission, Joint Research Centre (2011): Smart Grid projects in Europe: Lessons learned and current developments.

med bedre integration mellem energisektoren og andre sektorer i samfundet. Et nøgleord blev at skabe fleksibilitet på tværs af energiformer og på tværs af sektorer - energiformer og transport, bygninger og industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution. Også distributionen fik øget fokus. Herunder mulighederne for lagring af energi samt mulighederne for at konvertere vedvarende energiformer. Eksempler kunne være at udnytte overskydende strøm fra vindmøllerne til at producere brint ved elektrolyse eller at opgradere biogas til metan, som kan lagres i naturgasnettet.

Idéen om Smarte Energisystemer var for alvor etableret og blev i Danmark defineret som et omkostningseffektivt, bæredygtigt og sikkert energisystem, hvor vedvarende energiproduktion, infrastrukturer og energiforbrug er integreret og koordineret gennem energitjenester, aktive brugere og teknologier.¹⁰

Der blev indledt store test- og demonstrationsprojekter som Bornholm-, Nordhavn- og CITIES-projekterne, hvor forskellige teknologier og rammebetingelser blev udviklet og testet med henblik på at skabe fleksibilitet i energisystemet.

Demonstrationsprojekter har endvidere funktionen at accelerere vidensoverførsel fra universiteterne til øvrige aktører og at sikre, at forskningsresultater hurtigt og effektivt bliver indarbejdet i udviklede løsninger i en iterativ proces (se Figur 5). Denne type proces modvirker behovet for en vandfaldsmodel, der vil forsinke vejen gennem innovationskæden, og sikrer at hele innovationskæden fra grundlæggende forskning til udrulning bliver bragt i spil med bidrag til at løse udfordringerne også i forhold til 2030-målet om 70 % reduktion af CO₂-udledningen.



Figur 5. Demonstration udgør en platform for samarbejde mellem forskning og teknologiudvikling i en iterativ proces, der sikrer en accelereret udvikling.

¹⁰ Efter: Smart Energy Networks (2015): Vision for Smart Energy in Denmark. Research, development and demonstration.

Danmark er langt fremme med Smarte Energisystemer

Jvf. flere rapporter¹¹ så er Danmark det land i EU, der har iværksat flest smart grid-projekter. Jvf. EU-Kommissionens rapport 'Smart Grid Projects in Europe' indtog Danmark en førsteplads med 80 registrerede smart grid-projekter med et demonstrationsbudget på mindst 1 mio. euro, mens Tyskland lå nummer to på listen med omkring 40 projekter.¹²

Det smarte elsystem bør fremadrettet tænkes sammen med særligt mobilitet samt gas- og fjernvarmenettet i et sammenhængende smart energisystem. Danmark har et meget veludbygget fjernvarme- og gasnet, og der er derfor et godt udgangspunkt for at udnytte synergier mellem de forskellige energiformer og -net. Eksempelvis kan fjernvarme- og gassystemerne bruges til at lagre el fra vindkraft i andre energiformer til senere brug, når elprisen er lav. Alternativet til at lagre el er at udveksle strømmen med udlandet. Det er dog ikke nødvendigvis altid hensigtsmæssigt, da en bedre integration af el-, varme- og gassektorerne kan medvirke til at mindske brugen af fossile brændstoffer og udgøre et supplement til biomasse i fjernvarmesektoren.

Den danske energisektor står over for omfattende forandringer. Først og fremmest må der fremadrettet være langt større fokus på digitalisering, så man ved at mobilisere fleksibilitet i alle dele af samfundet kan balancere systemet, udnytte infrastrukturen optimalt og tilbyde kunderne nye services.

Systemet bør understøtte samfundsmæssige interesser i at bruge den grønne energi så intelligent som muligt. Det vil sige, at forbruget i den aktuelle situation bliver tilpasset energiforsyningen, således at den er såvel økonomisk og klimamæssigt mest bæredygtig. Det står således klart, at vi må tilvejebringe en intelligent styring af koblede energisystemer for at nå i mål. Vi er også nødt til at mobilisere fleksibilitet i bygninger, fuldt elektrificeret vejtransport, fjernvarme- og gas-systemer, der kan sørge for den overordnede balance, for eksempel når det blæser ekstra meget eller er vindstille. Og det vil ikke være økono-

misk forsvarligt alene at regne med hjælp fra nabolandene i samme grad som hidtil, fordi de selv står over for den samme problemstilling. Vi må derfor i højere grad mobilisere fleksibiliteten hos os selv. Her er den gode nyhed, at der er store muligheder for at mobilisere skjulte reserver i mange af samfundets sektorer. Projektet, som ligger til grund for denne rapport, har afdækket, at det er oplagt at kigge på transport, bygninger, industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og distribution.

En chance for Danmark

Frem til 2030 forventes verdens lande at øge investeringerne i energiløsninger til 13.500 milliarder US-dollars for at leve op til deres forpligtelser i Paris-aftalen, der skal beskytte klimaet. Yderligere 8.000 mia. USD forventes at blive investeret inden for distribueret intelligens, dataanalyse og kommunikationsteknologier.¹³

Når Danmark roser sig af en international førerposition inden for vedvarende energi, er der noget om snakken. For som land har vi gjort det godt over de seneste årtier. I forhold til niveauet i 1990, som er basisåret i de årlige internationale klimaforhandlinger, er Danmark det land, der har været i stand til at omstille sig mest fra fossile brændsler til vedvarende energikilder.¹⁴ Men der er ikke tale om én lang solstrålehistorie. Siden 2010 er de hjemlige investeringer i forskning og udvikling inden for vedvarende energi imidlertid stagneret. I 2016 og 2017 blev der tilmed skåret kraftigt ned i de offentlige investeringer i energiforskning (se Appendiks 3).¹⁵ Det er særligt udfordrende at opnå finansiering af forskning i selve systemaspektet og af forskning i enabler af Smarte Energisystemer.¹⁶ Det er velkendt, at manglende forskningsinvesteringer og rammebetingelser har konsekvenser for en branches forskning, innovation, beskæftigelse og eksport. Ikke lige med det samme. Men efter nogle år. Det vil sige nu, hvor gennemslagskraften af forskning er faldende (se Appendiks 3), og kvaliteten af rammebetingelser giver Danmark en placering nogenlunde midt i feltet af de industrilande, vi normalt sammenligner os med. Samme tendens ser

¹¹ Bl.a. Klima-, Energi- og Bygningsministeriet (2013): Smart Grid Strategi - Fremtidens Intelligente Energisystem.

¹² European Commission, Joint Research Centre (2011): Smart Grid projects in Europe: Lessons learned and current developments.

¹³ IEA (2015): Energy and Climate Change. World Energy Outlook. Special Briefing for COP21..

¹⁴ Energi-, Forsynings- og Klimaministeriet (2018): Danmark som foregangsland på energi og klima. Status på den grønne omstilling.

¹⁵ Damvad Analytics (2018): Er den danske styrkeposition inden for energiteknologi udfordret?

¹⁶ IRIS Group (2019): Analyse af statens indsats for forskning, udvikling og demonstration på energiområdet.

man for branchens eksport, som begyndte at falde i 2014 (se Appendiks 3). Ej heller er denne udvikling befordrende for uddannelse af de ingeniører, som kan og skal medvirke til, at vi når 2030 målene for CO₂-reduktion.

Alligevel er der håb om, at Danmark kan holde sig helt i front. Danmarks tidlige satsning på vindenergi har nemlig betydet, at danske virksomheder og offentlige forskere i dag besidder en unik viden om systemer, der kan håndtere udsving i produktion og forbrug af energi. Fx identificerede EU-kommissions Joint Research Center i 2014 DTU som den organisation i Europa med flest F&U-aktiviteter inden for området. Og Deloitte identificerede i 2017 intelligente energiløsninger som det energiteknologiske område med det største markedspotentiale for dansk industri.¹⁷ Så Danmark er i dag langt fremme inden for Smarte Energisystemer.

Imidlertid er der ingen garanti for at beholde førertrøjen. En lang række andre lande satser også markant på vedvarende energi og har derfor stor motivation til at udvikle egne intelligente energiløsninger. Energisystemet i de enkelte lande har forskelligheder. Det kan der være historiske årsager til – for eksempel politiske beslutninger om at fremme bestemte energiformer – lige som der er variationer i de naturlige forudsætninger. For eksempel er der store forskelle på betingelserne for vindkraft, vandkraft, solenergi og dyrkning af bioenergi-afgrøder mellem landene. Kort sagt kan man ikke nødvendigvis eksportere danske systemløsninger, der er skræddersyet til det danske energisystem til eksempelvis de øvrige europæiske lande eller til implementering i et samlet europæiske energisystem.

For at opnå målsætningen om en 70 % reduktion af CO₂-udledning i 2030 skal der ske en markant optrapning af indsatsen. I dag har vi reduceret CO₂-udledningen med 32 % ift. 1990 niveau. Dette svarer til 1,1 % per år. Med en målsætning på 70 % reduktion af CO₂-udledningen i 2030 skal vi fremover reducere CO₂-udledningen med 3,3 % per år. Vi skal således gennemføre den næste etape af den grønne omstilling 3 gange hurtigere, end vi har gjort indtil nu. Omstillingen skal laves, så Danmark kan drage mest mulig fordel af de ambitiøse politiske mål ved at fokusere på fleksibilitet baseret på digitalisering og

kunstig intelligens som alternativ til investeringer i kabler og energianlæg. Dette skal ske samtidig med, at eksportvirksomhederne udvikler energieffektive og -fleksible løsninger på forbrugssiden.

Endelig skal den enkelte forbruger have let digital adgang til at videregive sine forbrugsdata til 3. part, fx en elhandelsvirksomhed, aggregator eller serviceudbyder, da det vil fremme udviklingen af digitale løsninger, detailmarkedet og konkurrencen.

Som tidligere nævnt er den direkte elektrificering af opvarmning, transport og industri ikke tilstrækkelig til at nå 2030-målet. For at nå målet er det væsentligt, at der sker en udbygning med mere vedvarende energi og herunder specielt store anlæg med offshore vindmøller. Et sådant fremtidigt vejdrevet energisystem vil kalde på en øget fleksibilitet. Her forventes det, at digitalisering samt optimerede Power-to-X- og energilagringssystemer realiseret ved sektorkobling vil spille en afgørende rolle for fremtidens effektive energisystem.

I Danmark har vi et godt udgangspunkt med den eksisterende infrastruktur for el, gas og varme. Men det er vigtigt snart at få dannet grundlaget med de rette rammebetingelser, der også efter 2030 kan understøtte muligheder for investering i vedvarende energianlæg samt CCU/CCS løsninger,¹⁸ som et 100 % fossil-frit energisystem har som forudsætning. Udviklingen af data-intelligente Power-to-X og CCS løsninger vil på sigt få markant betydning for både el- og gas-systemet, og fjernvarmesystemerne vil være vel-eget til at sikre yderligere fleksibilitet og udnyttelse af spildvarmen fra eksempelvis Power-to-X produktionen. For at sikre fremtidens efterspørgsel på grønne brændstoffer (Power-to-X) vil nye smarte løsninger for at indfange, lagre og transportere CO₂ være helt centrale.¹⁹ Med store mængder af vindenergi vil en storskala investering i elektrolyse i Danmark blive hensigtsmæssig, og for gassystemet giver dette nye udfordringer og muligheder. Det danske gasnet og tilhørende lagre kan med fordel udnyttes. Denne udbygning skal afstemmes med udviklingen i efterspørgslen på brint og metan i Danmark og EU, og herunder i de nabolande som forsynes med metan fra Danmark. Det skal også ske under hensyntagen til, hvorledes andre ikke gasformige "energisektorer" såsom ammoniak og metanol måtte vinde indpas i energisektoren.

¹⁷ Deloitte (2017): Danmark som energiteknologisk pionerland.

¹⁸ CCU = Carbon capture and utilization og CCS = Carbon capture and storage.

¹⁹ Energinet (2020): Systemperspektiver ved 70 %-målet og storskala havvind.



Sektoren har behov for afklaring

En melding fra aktørerne i økosystemet er, at der råder betydelig usikkerhed om, hvilke kombinationer af udfordringer, teknologier og rammebetingelser der vil ske fremadrettet. Dialogen med aktørerne i løbet af projektet viser således, at der er mange forskellige bud på veje at prioritere at gå mellem energi ("Resource"), metoder til lagring og konvertering ("System") og/eller kobling til sektorer og interaktion med forbrugerne ("Services").

Aktørerne efterspørger simpelthen mere præcis viden om fremtidens kombinationer af udfordringer, teknologier og rammebetingelser. Det gælder særligt en række kernespørgsmål:

- Hvordan bliver vi i stand til at lagre og konvertere vedvarende energi ved at integrere på tværs af forskellige energiformer - fx fra sol- og vindenergi til fjernvarme, brint og Power-to-X?
- Hvordan skal der integreres på tværs af forskellige energiformer og transport - fx via lagring i batterier?
- Hvordan opnår vi fleksibilitet i elsystemet - fx ved at udnytte lagerkapaciteten af bygningsmassen og fjernvarmesystemerne?
- Hvordan opnår vi integration mellem energisektoren og anden industri - fx ved at lade personbiler, varevogne og lastbiler smart og udnytte overskudsvarme i fjernvarmesystemet i større udstrækning?
- Hvordan skal energisektoren og vandsektoren integreres - fx i forbindelse med fleksibel spildevandsbehandling, hvor beluftning og pumper styres, så man bruger strøm, når den er billig eller grøn?
- Hvilke sektorer er der størst behov for at målrette indsatsen mod ud fra et hensyn om grøn omstilling? Hvilke sektorer er der størst potentiale i at målrette mod indsatsen ud fra et hensyn om forskning og erhvervsudvikling?
- Hvordan bliver rammebetingelserne i det hele taget fremadrettet? Fx er det et åbent spørgsmål, hvordan afgifter og tariffer vil komme til at variere.

Vil det eksempelvis bare være hen over døgnnet, eller vil det være i forhold til CO₂-indholdet, så forbrugere kan købe vedvarende energi billigt, når produktionen af den er stor? Hvordan vil afgifter og tariffer påvirke forsyningssikkerhed, incitament-strukturer for kobling med og på tværs af sektorer og forsyningsarter og provenuet fra energiafgifter? Og hvordan vil koordineringen mellem TSO, DSO'er, aggregatorer og forbrugere ske fremover? Vil det være markedsbaseret eller kontrol-baseret? Eller en kombination?

- Hvordan sikres en udvikling af effektive og fleksible Power-to-X løsninger frem mod det fossil-frie samfund? Her tænkes på bl.a. udvikling af fremtidens grønne brændstoffer og i den forbindelse både på effektiv og bæredygtig udnyttelse af biomasseressourcer og på længere sigt udnyttelse af indfanget CO₂.

En anden melding fra aktørerne er, at svar på spørgsmålene ovenfor kan øge villigheden til at investere i forskning og innovation i Smarte Energisystemer og dermed bidrage til at accelerere den grønne omstilling. Dette vil samtidig give en vækst i omsætningen ift. smarte og grønne løsninger. En tredje melding fra sektoren er, at der kan være en pointe i at målrette fælles strategiske indsatser mod transportsektoren, opvarmning/køling, vandsektoren, og bygningerne.

Integrationen på tværs af sektorer halter, og energieffektivisering er fortsat vigtigt

Ud over dette gælder det, at både energiformerne og sektorerne samlet fremstår fragmenteret. For eksempel var det ønskeligt, at bygninger var bedre integreret med energisektoren. Bygninger har en meget vigtig opgave i både at fungere som kilde til fleksibilitet og indsatsområde for energieffektivisering. Byggeri og bygningsmassen står for ca. 40 % af energiforbruget og har meget stor potentiel kapacitet for fleksibilitet. Tre barrierer modvirker, at potentialet her kan udnyttes bedre. Dels udskiftes kun 0,5-1 % af bygningsmassen årligt, dels er vigtige dele af reguleringen af byggeri ikke indrettet på, at byggeri skal kunne få en rolle som kapacitet for fleksibilitet. Men mest alvorligt er det, at energispare-ordningerne lige nu er sat på pause. Der bør hurtigst muligt udvikles og afprøves data-intelligente og evidensbaserede løsninger, så der kan sættes turbo på energibesparelserne.

Fragmenteringen af energisektoren kan også registreres internationalt. Der kan opnås betydelige gevinster ved at koordinere udvikling og drift af de nationale energisystemer. Der er initiativer på europæisk og regional skala, fx de såkaldte regionale koordinationscentre for drift af transmissionssystemet, men der er et betydeligt samfundsøkonomisk potentiale i udvikling af nye metoder til at optimere energisystemet på tværs af landegrænser.

Hertil kommer, at forsyningssektoren har rammebetingelser, som belønner fokus på drift i en grad, der er stærkt begrænsende for mulighederne for at afsøge nye veje i samarbejde med de øvrige aktører i økosystemet. I betragtning af den omstilling, sektoren nu står over for, er det afgørende, at selskaberne får en incitamentsstruktur, der giver dem mulighed for at gå på to ben samtidigt – drift og udvikling – og dermed bedre mulighed for at deltage i forsknings- og innovationsprojekter. Sker det ikke, kan det blive et problem, da der så ikke bliver sat ind over for udfordringer og muligheder i det lange perspektiv (se Boks 7). Samtidig er universiteternes muligheder for af egen kraft at drive forskning og udvikling på dette samfundsmæssigt vigtige område blevet mindre, fordi mange forskningsprogrammer forudsætter, at der kan skaffes medfinansiering og deltagelse i projekterne fra aktører i den pågældende sektor.

”Netop hjemmemarkedet er vigtigt, fordi eksport af grønne løsninger ofte kræver, at virksomhederne har en stærk reference på hjemmemarkedet. Samtidig bidrager omstillingen til et intelligent og integreret energisystem baseret på vedvarende energi (smart energy) til, at Danmark kommer til at stå stærkt som et land, der afprøver nye komponenter og digitale teknologier i energiinfrastrukturen.”

(Kilde: IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen – En styrkeposition i vækst)

Boks 7. Kvalificeret og fremadrettet efterspørgsel på hjemmemarkedet er vigtig.

Energieffektivisering bør fortsat være prioriteret i indsatsen for en grøn omstilling. Her vil nye digitale og evidensbaserede metoder kunne lede til effektive og incitamentfremmende ordninger. Eksempelvis vil man på grundlag af de nye hyppige måleraflæsninger

kunne udvikle metoder for en ny digital og selvkalibrerende energimærkningsordning, og endelig vil energirenoeringsprojekter kunne effektiviseres gennem brug af AI- og data-intelligente metoder.

”Vi asfalterer, mens vi kører”

Sammenfattende gælder det, at der hersker relativt stor usikkerhed, mens sektoren døjer med en lav integration på tværs, og selskaberne primært belønnes for drift og et kort sigte.

Da der konstant sker nye udviklinger inden for både udfordringer, teknologi og regulering, betyder den kortsigtede fokus på driften, at man er nødt til at ”asfaltere, mens der køres”.

Derfor er der stor efterspørgsel fra sektoren efter en struktureret og fælles dialog om valg og prioriteringer af udfordringer, teknologier og regulering.

På den baggrund kan det være en værdifuld øvelse at bringe ovennævnte række af tematiske spørgsmål, der drejer sig om dette krydsfelt, frem til drøftelse i sektoren.

Dette gælder både for Danmark og for de lande, hvor dansk forskning i energiteknologi og erhvervsudvikling har udsigt til at kunne bidrage mest til den grønne omstilling og dermed til jobskabelse og eksport.

Når planlægning møder markeds kræfterne

Der er almindelig enighed blandt aktørerne om, at vi ikke skal tilbage til tankegangen fra 1970’erne, hvor man fra centralt hold besluttede, hvordan energisystemet skulle udvikle sig. Plantankegangen har ganske vist nogle fordele, idet man ved, hvad der kommer til at ske i en lang periode frem i tiden. Men ulemperne er for store: Det bliver ikke muligt at drage nytte af de mange nye tekniske muligheder, som åbner sig. Med den rivende aktivitet, der er internationalt inden for de mange forskellige typer af vedvarende energi, er det helt oplagt, at der vil ske gennembrud, som vil gøre bestemte løsninger mere attraktive. Det kan man ikke drage fordel af, hvis man har valgt at planlægge hele sit system med lang tidshorisont. Derfor virker det oplagt, at man skal benytte sig af markedsmekanismer, så de vedvarende energikilder, der viser sig mest effektive, kan blive valgt. Det gælder i øvrigt også på forbrugersiden. Det er ønskeligt, at forbrugerne får mulighed for at styre deres forbrug fleksibelt, så de kan købe vedvarende energi på tidspunkter, hvor den er billig.

Omvendt kan man ikke overlade udviklingen fuldstændigt til markedet, fordi de fleste energiformer kræver en infrastruktur. Eksempler kan være ladestationer til el-biler, rørsystemer til fjernvarme og naturgas mv. Derfor er der nødt til at være en kombination af planlægning og frie markedsme-



nismer. Her mangler der i dag præcisere viden om, hvilke kombinationer af udfordringer, teknologier og rammebetingelser, der skal herske. Der er behov for nye typer af analyseværktøjer, der kan optimere den samfundsøkonomiske nytteværdi, samtidig med at den distribuerede og dynamiske natur af fremtidens energisystem beskrives på en bedre måde.

Data-intelligent styring og optimering med henblik på balancering og systemydelser får en vigtig rolle

Digitalisering med henblik på data-intelligent styring og optimering i forbindelse med balancering, systemydelser og relaterede temaer skal være en del af drøftelsen i sektoren. Digitalisering anses som et meget vigtigt middel til at styre på tværs af energiformer og sektorer og vurderes dermed som afgørende for udviklingen af Smarte Energisystemer. Digitalisering - herunder analytics, kunstig intelligens og IoT løsninger - er essentielle for en acceleration af den grønne omstilling, idet fleksibiliteten fremover skal hentes i alle dele af samfundet.

En helt central udfordring bliver at sikre balance og drift af systemet, når vedvarende energiformer dækker en større andel af den samlede energiforsyning. Kun gennem udveksling af data på digital form vil det være muligt at skabe den nødvendige fleksibilitet samtidig med en sikker og stabil energiforsyning.

Men mulighederne i digitalisering rækker videre end det. Energisektorens forsyningsselskaber er pålagt at sikre meget høj forsyningssikkerhed. Et nøgleord er i denne sammenhæng asset management. Det vil sige at få mest muligt ud af ressourcerne, også på langt sigt. Ved hjælp af sensorer i ledningsnettet er det muligt at opfange signaler om potentielle nedbrud, før de faktisk sker. Her kan digitalisering og udnyttelse af kunstig intelligens identificere mønstre. Derved kan selskaberne reducere omfanget af skader og minimere omkostningerne ved reparation. Samtidig opnår selskaberne et bedre grundlag for at prioritere deres investeringer i ledningsnettet.

En tredje mulig effekt af digitalisering er aktivering af energiforbrugerne. Forbrugerne kan anvende løsninger til at styre deres energiforbrug bedre. Et eksem-

pel er, at de kan købe billig strøm fra vindmøller eller solceller i perioder, hvor der bliver produceret rigeligt.

En fjerde fordel er, at data, som energiforbrugerne producerer, kan anvendes til bedre styring af Smarte Energisystemer. Detaljerede data for virksomheder og husstandes forbrug kan skabe grundlag for mere intelligent regulering samt til at skabe datadrevet værdi i erhvervslivet og til at bedrive bedre forskning på universiteter.

Det fleksible forbrug kan medvirke til at løse fremtidens udfordringer i elnettet. Det er her nødvendigt at sondre mellem udfordringer i transmissionssystemet, hvor den systemansvarlige skal balancere et elsystem med markant mere vind, og i distributionssystemerne, hvor netvirksomhederne i stigende grad vil få udfordringer med flaskehalse i de lokale net og indpasse lokal elproduktion som fx solceller. Hvis det fleksible forbrug skal aktiveres for at hjælpe til at løse disse udfordringer, kræver det, at elmarkedet bliver i stand til at håndtere nye "fleksibilitetsydelser" som alternativ til eksempelvis regulerkraft ved termiske kraftværker i transmissionssystemet og netforstærkninger i distributionssystemet.

I Appendiks 4 er gengivet et mindre antal cases fra sektoren. Casene har til formål at illustrere fortællingen om sektoren, som den er redegjort for ovenfor, og at illustrere forskningsbehovene som redegøres for i kapitel 3-9.

Innovationen er udfordret - og dermed også eksporten

Danmark er i den absolutte verdenselite, når det kommer til energiforskning og eksport af energiteknologi, og Danmark har allerede formået at opbygge en række globale styrkeområder inden for blandt andet vindkraft, fjernvarme og energieffektivisering.²⁰

Danmark er det land i Europa, hvor eksport af energiteknologi udgør den største andel af den samlede nationale vareeksport (11,1 % i 2017).²¹ I fremtiden er der i øget grad behov for løsninger, der kan sikre, at energien bliver brugt mere intelligent, når den er til rådighed. Energikommissionen har således peget på, at der fremadrettet er behov for et paradigmeskift

²⁰ <https://trilemma.worldenergy.org/#!/energy-index>, <https://investindk.com/en/insights/denmark-has-one-of-the-worlds-best-energy-systems> og <https://stateofgreen.com/en/partners/state-of-green/news/denmark-in-top-five-among-the-worlds-best-electricity-systems/>

²¹ <https://stateofgreen.com/en/partners/danish-ministry-of-energy-utilities-and-climate/news/dkk-84-billion-in-danish-export-of-energy-technology-in-2016/> og Dansk Energi, DI Energi og Energistyrelsen: Eksport af Energiteknologi og -service 2017



med fokus på udvikling af et mere sammentænkt og markedsbaseret energisystem baseret på digitale løsninger, der effektivt kan udnytte energien fra de vedvarende kilder.²²

Smart Grids og intelligente systemløsninger til effektiv integration af vedvarende energi er allerede en dansk styrkeposition med betydelige erhvervsmuligheder. Danmark er verdensmestre i at integrere vindkraft i elsystemet,²³ nr. 1 i digitalisering i Europa²⁴ og EU-kommissionens Joint Research Center identificerede i 2014 DTU som den organisation i Europa med flest F&U-aktiviteter inden for smart Grids.²⁵

EUDP har identificeret Smart Energi som en gryende dansk styrkeposition,²⁶ og området er helt centralt

i Innovationsfondens nye energistrategi.²⁷ Smart Energy, digital infrastruktur, AI- og IoT-løsninger (Internet-of-Things) på systemniveau står til at blive centrale dele af et fremtidigt energi- og forsynings-system i hele verden.

Status er derfor, at sektoren målt på mange parametre fremstår som banebrydende og med et endog meget stort potentiale for også fremadrettet at bidrage til den grønne omstilling i Danmark og internationalt vha. udvikling og eksport af energiteknologier og jobskabelse.

Træerne gror dog ikke ind i himlen. Som tidligere nævnt er der i Danmark frem mod 2010 opbygget stigende bevillinger til energiforskning, stor viden-

²² Energikommissionen (2017): Energikommissionens anbefalinger til fremtidens energipolitik.

²³ <https://efkm.dk/aktuelt/nyheder/2018/jan/vindrekord/>

²⁴ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>

²⁵ <http://www.cee.elektro.dtu.dk/news/2013/04/denmark-is-leading-smart-grid-sg-research-in-europe?id=efc03125-afb9-4bf0-82ea-0babb294bed>

²⁶ EUDP (2017): EUDP Strategi 2017-19.

²⁷ Innovationsfonden (2016): Energi. Investeringsstrategi for Innovationsfonden 2016-18.

skabelig gennemslagskraft og høj eksportudvikling. Men siden 2010 har udviklingen været karakteriseret ved faldende bevillinger til energiforskning, faldende videnskabelig gennemslagskraft og fald i eksporten fra 2014 og til 2017.²⁸²⁹ Muligvis vil de stigende bevillinger til energiforskning fra 2020 og frem kunne fremme både den videnskabelige gennemslagskraft og eksportudviklingen.

Behov for mere venturekapital og flere startups

Eksportstrategien for branchen har som målsætning at fordoble eksporten til mindst 140 mia. kr. i 2030.³⁰ Det er forventningen, at væksten især vil ske på markederne i Storbritannien, Tyskland, Californien i USA, Kina og Sverige.³¹

En forudsætning for at opfylde denne målsætning er, at der også satses på at opfylde behov på de

primære vækstmarkeder i ovennævnte fem lande. Her er der især efterspørgsel på løsninger, der kan muliggøre øget anvendelse af vind- og solenergi vha. intelligente energisystemer. Det samme gælder Smarte Energisystemer, hvori der indgår flere forskellige vedvarende energiformer og nye teknologier (især batterier) til energilagring. Dette vil muliggøre, at elforbruget tilpasser sig produktionen af vind- og solenergi. Også elektrificering af transport og muligheder for at koble el-køretøjer til elnettet centralt og energieffektiviseringer fremstår vigtige på disse markeder.

Størrelsen af ventureinvesteringer på energi- og miljøområdet har de seneste fire år udgjort mindre end én procent af de samlede vækst- og ventureinvesteringer i Danmark.³² Skal missionen med at fordoble eksporten lykkes, er det nødvendigt at skabe rammer for flere danske startup-virksomheder.

²⁸ Damvad Analytics (2018): Er den danske styrkeposition inden for energiteknologi udfordret?

²⁹ Dansk Energi, DI Energi og Energistyrelsen: Eksport af Energiteknologi og -service 2017

³⁰ <https://em.dk/nyhedsarkiv/2018/marts/ministre-vil-fordoble-eksport-af-dansk-energiteknologi/> og <https://efkm.dk/temaer/eksportstrategi-for-energiomraadet/>

³¹ IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen - En styrkeposition i vækst.

³² IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen - En styrkeposition i vækst.

Grundmodel for Smarte Energisystemer & grøn omstilling, erhvervsudvikling og forbrugerfokus

Grundmodel med fire niveauer

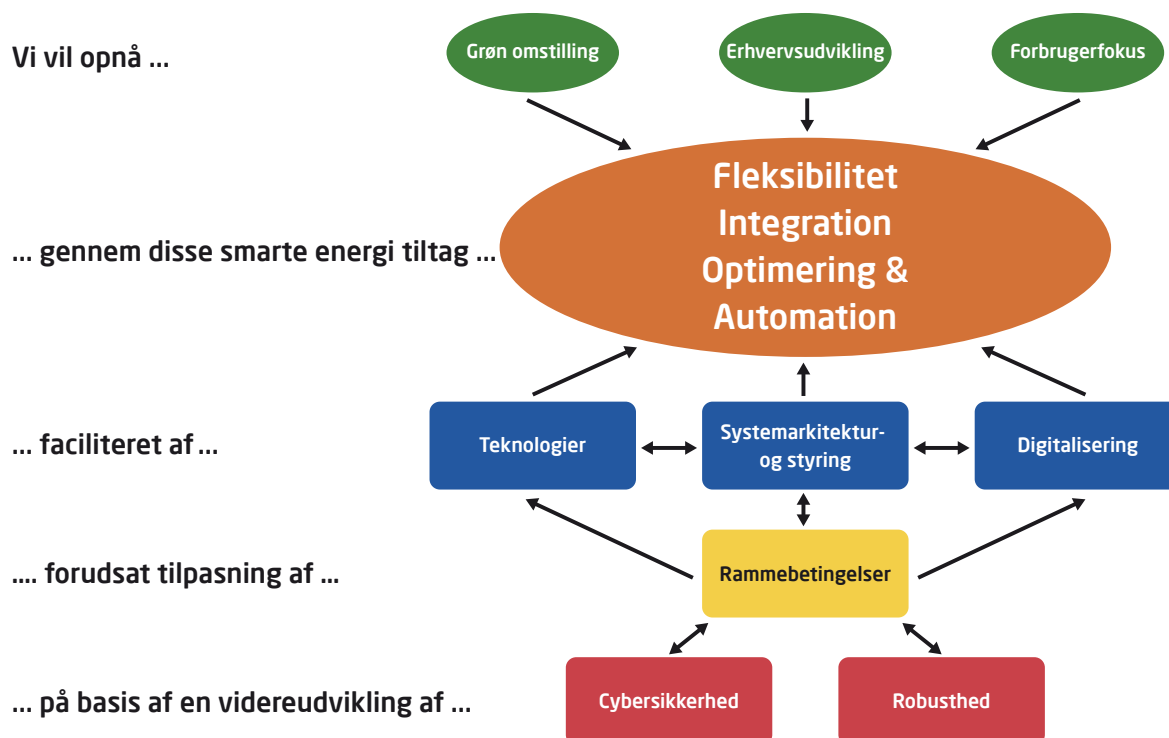
I sektorudviklingsprojektet er der udviklet en grundmodel (se Figur 6), der tager udgangspunkt i, at udviklingen af Smarte Energisystemer skal tage højde for flere niveauer.

Det første niveau i modellen udgøres af de målsætninger, som systemet skal leve op til. Det vil typisk være målsætninger om grøn omstilling, erhvervsudvikling og fokus på forbrugernes behov.

Det næste niveau beskriver de virkemidler, der

skal gøre det muligt at opfylde målsætningerne. Nøgleord er fleksibilitet, integration, optimering og automation.

Det tredje niveau udgøres af understøttende metoder, teknologier og rammebetingelser. Eksempler er udvikling af nye teknologier til at mobilisere fleksibilitet og fremme integration etc., samt systemarkitektur, styringsteknologi, digitalisering og rammer for forsyningssektoren og dynamikker i tariffer og afgifter.



Figur 6. Grundmodellen for Smarte Energisystemer.

Endelig er det nødvendigt at have et fjerde niveau, som beskriver, hvordan systemet skal håndtere hensyn til cybersikkerhed, herunder beskyttelse af private data, samt generel robusthed.

Grundmodellen er grafisk fremstillet i Figur 6 og udfoldes i resten af dette kapitel og i kapitel 4-7.

Grøn omstilling og erhvervsudvikling

Energiteknologisektoren i Danmark er en banebrydende bidragsyder til den grønne omstilling i kraft af den høje andel af sol- og vindenergi i energisystemet. Balancering og systemdrift af energisystemet ved at udnytte fleksibilitet er afgørende for at løfte andelen af vedvarende energiformer til nye højder, så Paris-klimamålene kan nås. Og det er altafgørende, at fleksibiliteten i alle dele af samfundet kommer i spil.

En meget vigtig nøgle er her udvikling af Smarte Energisystemer, som indebærer forskning i styring ved hjælp af digitalisering, fleksibilitet og integration, robusthed, tilpasning af rammebetingelser og test- og demonstrationsprojekter. Herudover vil lagring og konvertering af vedvarende energikilder indgå som meget vigtige dele af den grønne omstilling. Bl.a. på baggrund af disse indsatser kan det igangværende erhvervseventyr og udvikling af en startup scene baseret på service-baserede forretningsmodeller medvirke til, at energisektoren fortsat accelerer den grønne omstilling i Danmark og i lande med stor andel af den samlede CO₂-udledning i Verden.

Eksportstrategien for energiteknologibranchen har en målsætning om at fordoble eksporten til mindst 140 mia. kr. i 2030.³³ Det er som sagt forventningen, at væksten især vil ske i nationer, der satser massivt på vedvarende energi, og som i dag er vigtige eksportmarkeder for dansk energiteknologi. Det drejer sig

især om de fem lande Storbritannien, Tyskland, nogle delstater i USA (især Californien), Kina og Sverige.³⁴

Herudover er det klart, at efterspørgslen på energiteknologi på det danske marked også fortsat vil udgøre en vigtig del af omsætningen og indtjeningen i branchen.

Så en forudsætning for at opfylde målsætningen om fordobling af eksporten er, at der parallelt satses på at opfylde behov i Danmark og i de primære vækstmarkeder i de fem lande.

Med Energiaftalen³⁵ fra 2018 har man fået etableret en langsigtet plan for, hvordan Danmark skal kunne nå i mål og opfylde Paris-klimamålene i 2030. Energiaftalen indeholder en lang række af beslutninger om handlinger mht. udfordringer, teknologier og rammebetingelser, som både understøtter og er afhængige af udvikling af Smarte Energisystemer.³⁶

Ud over spørgsmålet om hvordan det eksisterende erhvervsliv og forskningsinstitutioner vil arbejde fremadrettet med de behov for energiteknologi, der er i Danmark og i andre lande, er det også et relevant spørgsmål, hvordan iværksættervirksomheder kan udnytte mulighederne, og hvordan der kan etableres en startup scene, som indtænker behovene i Danmark og i de fem lande.

Mht. iværksættervirksomheder og en startup scene er det en udfordring, at størrelsen af vækst- og ventureinvesteringer på energi- og miljøområdet de seneste fire år udgjort mindre end én procent af de samlede vækst- og ventureinvesteringer i Danmark.³⁷

Skal iværksætter og en startup scene medvirke til at opfylde eksportstrategiens målsætning om en fordobling af eksporten, er der derfor ingen tvivl om, at det

³³ <https://em.dk/nyhedsarkiv/2018/marts/ministre-vil-fordoble-eksport-af-dansk-energiteknologi/> og <https://efkm.dk/temaer/eksportstrategi-for-energiomraadet/>

³⁴ IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen - En styrkeposition i vækst.

³⁵ Energi-, Forsynings- og Klimaministeriet (2018): Energiaftale af 29. juni 2018.

³⁶ De er: (a) Der etableres tre havvindmøleparker på samlet set mindst 2.400 MW, (b) Der afsættes 4,2 milliarder kroner til udbud, hvor forskellige teknologier som landvindmøller og solceller kan konkurrere om at levere grøn strøm billigst, (c) Der afsættes penge til oprettelsen af en pulje på over fire milliarder kroner til at udbygge produktionen af grøn biogas. En andel af pengene reserveres til økologisk biogas, (d) Parterne afsætter en halv milliard kroner årligt i perioden 2021-2024 til en markedsbaseret tilskudspulje til en målrettet energisparsindsats. Henvendt primært mod erhverv, (e) Parterne afsætter derudover en reserve på 400 millioner kroner i 2025 og 500 millioner kroner årligt til yderligere indsatser fra 2026 til fremme af vedvarende energi, (f) Afgifter lempes på el og elvarme på to milliarder kroner i 2025 (eksklusiv moms), (g) Der afsættes en pulje til grøn transport på 500 millioner kroner i 2020-2024, der skal fremme grøn mobilitet og transport, (h) Der bliver også afsat penge til energi- og klimaforskningen - med et mål på en milliard kroner i 2024, (i) Derudover afsættes der et ikke nærmere specificeret beløb til at håndtere bortfald af grundbeløbsstøtten, fremme overskudsvarme og eksporten af energiteknologier og (j) Desuden besluttede parterne at tilslutte sig det internationale initiativ om at udfase kul i den danske elproduktion inden 2030.

³⁷ IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen - En styrkeposition i vækst.

ydermere er nødvendigt at accelerere udviklingen af disse i Danmark.

Hvad enten der er tale om etablerede virksomheder, iværksættervirksomheder eller aktiviteter på en startup scene, er det et vigtigt spørgsmål, hvilke produkter og services, forretningsmodeller mv. erhvervsudviklingen om Smarte Energisystemer fremadrettet vil basere sig på.

Helt overordnet afhænger svaret af, hvilke udfordringer, man i Danmark og især de fem lande prioriterer at imødegå, hvilke teknologier de anvender, og hvilken regulering og incitamentsstrukturer, der vil blive implementeret.

Konkret er spørgsmålet, hvilke kombinationer der vælges af vedvarende og fossile energiformer, metoder til konvertering og lagring af vedvarende energiformer, og hvilke af sektorerne transport, bygninger og industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og distribution der kobles og anvendes som medium for konvertering og lagring af vedvarende energi og dermed anvendes som middel til at mobilisere fleksibilitet i energisystemet. Spørgsmålet er også, hvilke kombinationer af ovenstående parametre der vil ske på tvær af landes energisystemer.

Der vil ikke være nogen tvivl om, at samtidigt med at energiteknologisektoren fortsat vil levere enkeltstående komponenter, så vil erhvervsudviklingen i sektoren fremadrettet i gradvist større udstrækning ske ved udvikling og salg af kombinationer af produkt- og serviceløsninger (måske endda produkt-service systemer), og mekanismen til at tjene penge på salget vil være service-baserede forretningsmodeller.

Ydermere er det muligt, at energisektoren vil opleve en udvikling som i hotelbranchen (med Airbnb) og i taxibranchen (med Uber). Så muligvis vil IT virksomheder med meget stærke dataanalytiske kompetencer og ekstremt forbrugerfokus ved hjælp af en dataplatformøkonomi-tilgang omstøde og måske endda nedbryde veletablerede virksomheders forretningsmodeller og dermed forretningsgrundlag.

Forbrugerfokus

Forbrugere vil spille en central rolle i den grønne omstilling. I fremtiden vil forbrugere få flere valgmuligheder, og deres forbrugerrettigheder vil blive styrket. Forbrugere vil være aktive og helt centrale aktører i fremtidens energimarked, og alle vil få mulighed for at deltage i den grønne omstilling på egen hånd ved selv at producere vedvarende energi og sende den ind i energinettet. Forbrugere vil blive i stand til at interagere mere vha. nye services og forretningsmodeller, som udbydes af et voksende antal distribuerede energiteknologier og ikke mindst vha. digitalisering. Som et eksempel vil elbiler blive meget udbredt, og et utal af digitale løsninger vil fungere integreret med hinanden. Dette muliggør etablering af mange og forskelligartede nye forbrugere fokuserede forretningsmodeller. Tilsvarende vil nye data-drevne og automatiske løsninger hos forbrugere og industrien kunne komme i spil. EU arbejder for tiden på visioner for såkaldte aggregatorer, der vil være i stand til at sende pris-signaler til forbrugerne, som kan bringe en større del af fleksibilitetspotentialen i spil.

Europa Kommissionen arbejder i det hele taget for at fremme denne form for demokratisering af energiforsyningen. Den 30. november 2016 præsenterede Europa Kommissionen en pakke med tiltag, "Clean Energy for All Europeans", som blev vedtaget af Europa Parlamentet den 26. marts 2019. Pakken indebærer blandt andet øget gennemsigtighed og bedre regulering i lyset af de større muligheder, som civilsamfundet har for at blive mere involveret i energisystemet og reagere på prissignaler. Pakken indeholder også et antal tiltag, som har til formål at beskytte de mest sårbare forbrugere. Som et specifikt tiltag har pakken fokus på borgerenergifællesskaber, som har som primært formål at skabe miljømæssige og sociale fordele (det er et non-profit initiativ) for deres medlemmer eller for det lokalområde, hvor det er i operation. Borgerenergifællesskaberne skal blive i stand til at dele energi indbyrdes mellem medlemmer, som er produceret vha. deres fællesjede installationer.³⁸ Det er afgørende, at reglerne for borgerenergifællesskaber etableres således, at det uden yderligere hindringer kan bringes i spil i hele samfundet.

³⁸ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>, <https://ing.dk/artikel/radius-for-mand-forbrugerne-skal-vaere-medbyggere-paa-fremtidens-energisystem-214563> og <https://ing.dk/artikel/professor-deleoekonomi-paa-vej-elforsyningen-193566>

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan kan vi designe og drive et mere bruger-fokuseret fremtidigt Smart Energisystem?
- Hvordan kan prosumers, konventionelle forbrugere, peer-to-peer og engro-detail markeder fungere i et samspil?
- Hvordan kan vi anvende digitalisering optimalt med formålet at lykkes med kompleks men ikke desto mindre relativt ubesværet management af energisystemer?
- Hvordan gentænker vi markedsstrukturer mhp. at fremme udviklingen af forskellige og muligvis irrationelle præferencer hos privatforbrugerne?
- Hvordan understøtter vi ny typer af forbrugercentrerede organisationer inden for elektricitetsmarkeder, fx baseret på peer-to-peer markeder og borgerenergifællesskaber?
- Hvilke er konsekvenserne af forbrugerfokus for drift af elsystemer, fx for både TSO'er, DSO'er og elnetservices?
- Hvilke er de vigtigste ændringer til regulering, såfremt energisystemet skal gøres mere forbrugerfokuseret?

En forudsætning for at udnytte potentialet i digitalisering af Smarte Energisystemer er, at der produceres realtidsdata om forbrug af energi. Det er velkendt, at både forbrugere i husholdninger og forbrugere i private virksomheder og offentlige institutioner ikke manuelt vil reagere på realtidsinformationer om produktion af vedvarende energi. Med andre ord, at forbrugerne selv ville lægge deres forbrug sådan, at de købte billig vindenergi, når vinden blæste meget.

Som et alternativ kan man forestille sig, at forbrugerne indgår aftaler med en tredjepart om styringen af deres energiforbrug.³⁹ Det vil sige, at forbrugeren giver selskabet fuldmagt til at tilrettelægge energiforbruget i forhold til fluktuationerne. Forbrugervalget vil så at sige blive

automatiseret. Dette vil fx kunne kombineres med andre services til kunden. Endnu et alternativ som har vist sin styrke, er at fokusere på automatisk reagerer på broadcastede prissignaler fra en såkaldt teknisk aggregator.⁴⁰

Samtidigt gælder det, at forståelsen af forbrugeradfærd er afgørende for at realisere det fulde potentiale i digitalisering af Smarte Energisystemer. Denne forståelse synes endnu ikke at foreligge og efterspørges af fx både IEA og Center on Global Energy Policy, Columbia University.⁴¹ En forskningsindsats baseret på sociologiske og antropologiske fagdiscipliner specifikt om at etablere denne forståelse vil kunne medvirke til at reducere barrieren.

Boks 8. Gør forbrugerens valg automatis

³⁹ <https://www.ecogrid.dk>

⁴⁰ Denne løsning er beskrevet i detaljer i [kilde - en ny bog (referene til Springer bogen om fremtidens smart grids)].

⁴¹ <https://www.youtube.com/watch?v=sdZn2bTM9Y>



Fleksibilitet, integration og optimering/automation

Fleksibilitet

Traditionelt handles el og energi på almindelige markedsprincipper. På de eksisterende engrosmarkeder er fleksibiliteten karakteriseret gennem den såkaldte priselasticitet. Der er imidlertid brug for en ny forståelse - og nye beskrivelser - af fleksibilitet. Dette beror på, at eksempelvis visse former for el-forbrug let kan udsættes fx 5 minutter, mens leverancen af fjernvarme kan udsættes eller afbrydes i en time eller længere. Det er også klart, at såfremt fx. en køledisk i et supermarked har været afbrudt i måske 10 minutter, så vil den måske ikke kunne afbrydes i endnu 10 minutter. Der er således brug for en udvidelse af beskrivelsen af fleksibilitet som en statisk egenskab til en dynamisk egenskab, og som fx kan beskrives gennem en funktion frem for en konstant. Tilsvarende er der behov for en udvikling af digitaliserede fleksibilitetsmarkeder, hvor den dynamiske fleksibilitet kan bringes i spil.

Som tidligere nævnt skal fokus fremadrettet flyttes fra de centrale energiproducerende enheder til de decentrale energiforbrugende enheder, som skal i spil for at kunne levere den nødvendige fleksibilitet for at skabe balance mellem den fremtidige vedvarende energiproduktion (i DK primært vind og sol) og forbruget. Dette udgør en kompleks omstilling, idet brugeradfærd og accept vil spille en stor rolle. Kom-

pleksiteten af den fremadrettede dynamiske fleksibilitet for eksempelvis en bygning kan illustreres ved at fleksibiliteten for en smart bygning vil afhænge af: 1) isoleringen og tætheden, 2) valg og placering af termisk masse, 3) varme/kølesystemet, 4) hvorledes brugerne kan interagere med varmesystem og hus (fx åbning af vinduer), 5) bruger opførsel, og 6) hvorledes bygningens varmesystem kan styres fx fra et cloud baseret styresystem eller grid-operatøren. Fleksibiliteten af den smarte bygning afgøres af alle disse 6 elementer, og derfor vil digitalisering, Big Data, AI og IoT blive afgørende for, om denne fleksibilitet kan bringes i spil på operationel vis. Samtidig er det også vigtigt, at fleksibiliteten af fx rensningsanlæg, supermarkeder og fjernvarmesystemer kan beskrives gennem tilsvarende fleksibilitetsfunktioner.

I EU-regi er der ved at blive udviklet en såkaldt Smartness Ready Indicator (SRI), men dette er en statisk beskrivelse og en beskrivelse, som ikke umiddelbart kan tilpasses fx de forskellige klimazoner i EU. Forskellige klimazoner og forskellige karakteristika for energisystemer verden over vil reelt betyde, at der er behov for en forskelligartet fleksibilitet. Derfor er der brug for en udvikling af et data- og evidensbaseret fleksibilitetsindeks, som kan optimeres i forhold til den aktuelle udfordring (klimazone, el-net, mv.).

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan etableres en matematisk beskrivelse af fleksibilitet, som er operationel i forhold til at kunne anvendes for smarte boliger og andre enheder i fremtidens smarte energisystem?
- Hvordan etableres og estimeres et data- og evidensbaseret alternativ til SRI?
- Hvordan etableres mest hensigtsmæssigt et marked for fleksibilitet, som kan anvende fleksibilitetsydelse, dynamiske fleksibilitetsfunktioner og/eller andre fleksibilitetsprodukter?
- Hvordan etableres et klimatilpasset optimalt fleksibilitetsindeks?
- Hvordan kan dette nye fleksibilitetsindeks anvendes til at fx designe smarte bygninger og smarte byer, således at de er designet optimalt ift. de aktuelle variationer i fx solenergi-produktionen.

Integration

Sektorkobling er hidtil primært sket på systemniveau, hvor systemintegration mellem aktører i de forskellige energisektorer (el, gas, og fjernvarme samt i nogle tilfælde affald og vand) sikrer en økonomisk optimal og robust drift af energisystemet. Fremover bør sektorkobling også ske på slutbrugerniveau for at opnå størst mulig fleksibilitet, og for fx at kunne tilvejebringe styringer af det lokale forsyningsnet.

Danmark er på flere områder et foregangsland for sektorkobling. Gennem de sidste 30 år⁴² har vi brugt kraftvarmeverker i vores fjernvarmeforsyning og dermed koblet varme- og elsektorerne. For at tilpasse produktionen til en varierende el-efterspørgsel blev der indført særlige tariffer (såkaldte tre-leds-tariffer) for de decentrale kraftvarmeverker. Værkerne fik dermed incitament til at bygge varmelagre, så produktionen kunne tilpasses el-efterspørgslen.

Oprindeligt skete samproduktionen af el og varme ud fra et effektivitetskrav. Den grønne omstilling med en stor andel vind- og solkraft skaber nye udfordringer om fleksibilitet og mulighed for billig energi i timer med meget vindenergi. Her giver de eksisterende varmelagre i fjernvarmesektoren en oplagt fleksibilitetsmulighed. Tilsvarende er der store lagringsmuligheder i gassektorens infrastruktur, som giver denne sektor stor fleksibilitet i forhold til en kobling til elsektoren.

Vindkraftens billige el i perioder med rigeligt vindkraft gør, at der ikke længere kun er en gevinst i at producere kraftvarme eller bruge gas til elproduktion,

når elpriserne er høje (når der er behov for ekstra elektricitet i forhold til vind mm.). Varmepumper eller elpatroner (P2H) i fjernvarmesektoren eller elektrolyse (P2G) gør det muligt at udnytte den billige el i perioder, hvor denne har mere værdi som varme eller gas.

Sektorkoblingen muliggør en systemintegration med tilhørende lagermuligheder i de enkelte energi- og servicesektorer. Sektorkobling spiller også godt sammen med intelligent (smart) brug af energi i servicesektorerne, fx transport og intelligent styring af energi i bygninger og industri. Et smart energisystem bør derfor både optimere brugen af ressourcer, sektorkobling samt intelligent slutforbrug.

En fordel ved, at sektorkobling sker på systemniveau, er, at aktørerne er professionelle og derved optimerer deres drift ud fra markedssignaler (ofte priser) og forretningsmuligheder. Fremover skal sektorkoblingen også ske hos slutbrugerne, idet vi dermed vil kunne fremme fleksibiliteten, og vi så vil kunne få etableret et yderligere redskab til løsning af fx netkapacitetsproblemer i nærheden af slutbrugerne. Dette kan være med til at sikre, at en eventuel udbygning af distributionsnet foretages på en samfundsøkonomisk effektiv og forsvarlig måde. Udover teknologisk udvikling og udbygning af infrastrukturen er energiøkonomisk design af rammebetingelser, som muliggør forretningsmuligheder (business cases), der gavner en samfundsøkonomisk og robust grøn omstilling, en af de største udfordringer for at øge sektorkoblingen.

⁴² Reference til Figur 4 "Det historiske energisystemtræ" med Varmeloven i 1979 og energiplanlægningen i 80'erne.

Realisering af 2030-målet vil lede til et væsentligt øget elforbrug gennem en direkte elektrificering af opvarmning, transport og industri. Denne direkte elektrificering er dog ikke tilstrækkelig til at nå 2030-målet. For at nå målet er det væsentligt, at der sker en udbygning med mere vedvarende energi og herunder specielt store anlæg med offshore vindmøller. Et sådant fremtidigt vejrdrevet energisystem vil kalde på en øget fleksibilitet. Her forventes det, at digitalisering i kombination med sektorkobling vil spille en afgørende rolle.

For en succesfuld integration er en udvikling mod en tættere kobling mellem markeder og fysik afgørende. Dette gælder for både el- og fjernvarmenet. Muligheden for at udnytte fleksibelt forbrug bedre – både geografisk og som netreserve – har betydning for, om effekten fra havvinden kan transporteres effektivt. For fjernvarmesystemer vil det give bedre muligheder for udnyttelse af overskudsvarme lokalt. Fleksibilitetstiltag anvendt på denne måde (det vil sige i omfang, geografi og tidsopløsning) kræver en højere grad af automatisering af systemdriften og øget

anvendelse af kunstig intelligens til at vurdere den nødvendige respons ved nær-realtidspriser.

I Danmark har vi et godt udgangspunkt med den eksisterende infrastruktur for el, gas og varme. Men det er vigtigt snart at få dannet grundlaget med de rette rammebetingelser, der også efter 2030 kan understøtte muligheder for investering i vedvarende energianlæg samt CCU/CCS løsninger, som et 100 % fossil-frit energisystem har som forudsætning. Udviklingen af Power-to-X, energilagring og CCU/CCS løsninger vil på sigt få markant betydning for både el og gas-systemet, og fjernvarmesystemerne vil være velegnet til at sikre yderligere fleksibilitet og udnyttelse af spildvarmen fra eksempelvis Power-to-X produktionen. Når vi nærmer os det fossil-frie samfund vil efterspørgsel på grønne brændstoffer (Power-to-X) kalde på nye forbedrede syntesemetoder og optimeret og bæredygtig brug af biomasseressourcer. Det kan blive nødvendigt at indfange, lagre og transportere CO₂, idet adgang til grønne CO₂ kilder bliver væsentlig for udviklingen af grønne brændstoffer (fx. grøn metanol).⁴³

Forskningsspørgsmål:

- Hvad er behovet for og værdien af fleksibilitet opnået gennem sektorkobling?
- Hvordan udvikles bedst data- og kommunikationsplatforme i samspil med nye smart energi kontrol-systemer?
- Hvorledes sikres en udbygning af energisystemet og produktionsmuligheder, som fremmer Power-to-X og en effektiv udnyttelse af kulstof fra biomasse og CO₂ kilder?
- Hvordan etableres et større fleksibilitetsmarked, hvor fleksibilitetsprodukter, der relateres til energisystemet, kan handles på tværs af sektorer?

Optimering/automation

Optimering og automation er centrale elementer i Smarte Energisystemer. De udgør bindeleddet mellem teknologi, data og systemarkitektur på den ene side og grøn omstilling, service-baserede forretningsmodeller og platformøkonomi på den anden side. Automation giver grundlaget for, at en stor del af digitaliseringspotentialer kan udnyttes, da det giver muligheder for at kunne påvirke de forskellige dele af energisystemet. Automation muliggør, at en optimal anvendelse af teknologiudnyttelse af fleksibilitet kan

ske så let som muligt, så nytteværdien kan høstes så omkostningseffektivt som muligt for forbrugere og systemoperatører.

Automation skal bringes i anvendelse på forskellige niveauer af det Smarte Energisystem. Det skal ske på det laveste niveau i husholdningerne fx i opladere til elbiler og på højere niveauer fx i ladestationer, HV-DC-links (High Voltage Direct Current) og driften af de forskellige net osv. Automation er fundamentet for at

⁴³ Energinet (2020): Systemperspektiver ved 70 %-målet og storskala havvind.

muliggøre en udnyttelse af fordelene ved teknologi og fleksibilitet, således at alle systemets elementer kan koordineres og bringes i anvendelse gennem udnyttelse af markeder og analytics.

Alle de mange forskellige muligheder for optimering af design og drift bør tages i betragtning. Herunder de mange forskellige analyseværktøjer, der kan anvendes på de mange forskellige optimeringsudfordringer. Det gælder såvel ved design af de enkelte delsystemer som den overordnede arkitektur, samt værktøjer der indgår i den daglige drift og kan optimere udnyttelsen af de enkelte komponenter ud fra den aktuelle driftssituation.

Nogle af optimeringsudfordringerne vil være at finde på det decentrale niveau, som udgøres af fx husholdninger med solceller, lagring og elektriske køretøjer. Her vil optimering kunne anvendes til at koordinere disse forskellige aktiver i forhold til hinanden både i normal drift af systemet såvel som i situationer med vedligehold og fejl, som kan blive automatisk og optimalt håndteret. Man kan endvidere forestille sig en bottom-up tilgang, hvor optimering vil have som

formål at gennemføre en fuldstændig koordination af hele det Smarte Energisystem.

Automation og udvikling af passende styringsarkitektur af energisystemet kan gøre det muligt at give adgang til tredje part, således at de vil kunne bidrage til driften af systemet gennem standardiserede interfaces. Dvs., de er snarere designet af mekanismer, fx markeder, der vil fremme udvikling af det rette niveau af koordination og af incitamenter, der kan resultere i optimal forbrugeradfærd.

Automation vil også kunne anvendes til at udforme løsninger for fremtidens netservices på en måde, som udnytter fremtidens fleksibilitet hos slutbrugerne. Herved vil der kunne ske en omkostningsbestemt og effektiv planlægning af fx. netudbygninger.

Generelt vil der i fremtiden være behov for simple og robuste kontrolbaserede løsninger - fx baseret på simple udmeldinger af prissignaler. Dette vil reducere kravet til komplekse interfaces, samt øge IT-sikkerheden og optimere hensynet til GDPR og privatlivshensyn generelt.

Forskningsspørgsmål:

Vedr. drift:

- Hvordan sikrer vi, at de styringsindgreb, der er mulige for en driftsoperatør, bliver prioriteret og præsenteret, så der kan gribes korrekt ind?
- Hvordan kan vi definere højniveau automatisering, så komplekse og sammensatte systemer kan foretage relevante indgreb automatisk fx omkobling i net, reduktion af forbrug lokalt og kompensering andet steds og samspil med driftsoperatører?
- Hvordan kan aggregatorer optimalt interagere med flere markeder af forskellig natur, fx day-ahead, frekvens og DSO markeder?

Vedr. design:

- Hvordan fastlægges automationsniveau, netværkstopologi, omkoblingsmuligheder og koordination mellem aktører?
- Hvordan udvikles et styringskoncept, der muliggør automatisk drift og koordineret drift mellem delsystemer herunder definition af højniveau styringsindgreb og tilstandsudveksling?

Analyse:

- Hvordan udvikles værktøjer til analyse af samspil mellem automation, netværk, slutbruger enheder og optimerings især i større systemer?
- Hvordan kan der etableres aggregatorer som kan tilvejebringe fleksibiliteten under størst mulig hensyntagen til IT-sikkerheden?

Teknologier, systemarkitektur, styring og digitalisering

Teknologier

Andre områder inden for energiforskningen kan få indflydelse på fremtidens Smarte Energisystemer. Der er to afsæt for dette. For det første vil en fortsat vækst i vedvarende energis andel af den samlede energiforsyning ikke længere så meget kunne ske ved integration med omkringliggende landes energisystemer. Det skyldes, at disse lande nu selv er på vej til at opnå en høj andel af vedvarende energi, hvorfor vedvarende energi produceret i Danmark ikke i samme omfang kan afsættes på landenes markeder. Populært kan man sige, at "hvad der ikke længere udad kan vindes, fremover skal indad vindes". En hel række af teknologier er nøglen til, at dette kan lade sig gøre.

Den anden årsag har at gøre med tidshorisonten i energisystemet. Styring og kontrol vha. digitalisering kan medvirke til at sikre balancering af energisystemet og forsyningssikkerhed over den korte tidshorisont. Men mht. den lange tidshorisont skal styring og kontrol vha. digitalisering stå skulder ved skulder med teknologier som elektrificering, lagring og konvertering.

På den baggrund er der behov for forskning i teknologier. I denne rapport skelner vi dog mellem konkrete energikonverterings- og lagringsteknologier, som ikke bliver behandlet her, og teknologier der muliggør det Smarte Energisystem. Kun sidstnævnte behandles i denne rapport. Det er dog stadig vigtigt at understrege, at der konkret er brug for forskning i storskala lagring af vedvarende energi. I dag er mulighederne for lagring uden betydelige tab beskedne. Hvis der sker afgørende gennembrud inden for lagring, kan det ændre situationen markant. Også teknologi, der effektivt kan konvertere strøm til gas (Power-to-Gas) eller andre energikilder, der kan lagres, kan spille afgørende ind på udviklingen af Smarte Energisystemer. I denne forbindelse vil det være særdeles relevant

med forskning i integration af lagring og konvertering i Smarte Energisystemer.

Som et eksempel på behovet for forskning i integration af lagring kan nævnes store, centrale kraftvarmeverker. Disse er store konstruktioner af avancerede materialer, som arbejder ved både høje tryk og temperaturer. Det indebærer, at lastændring har en omkostning i form af levetid. Optimering af dette kræver stor indsigt i de materialemæssige konsekvenser for levetid ved dynamisk drift og hurtige lastændringer, hvorved fleksibilitet er tæt koblet med asset management. Samtidig er det væsentligt, at anlægget som en del af systemet sikrer, at behov for både el og varme er dækket.

Et andet eksempel er udbyttet af dynamisk drift med en mellemstor varmepumpe. Denne type anlæg er typisk konstrueret konservativt med konstant drift ved dimensionerende last som udgangspunkt. Ved dynamisk drift vil varmepumpen kunne indgå som en fleksibel forbruger i el-systemet. Derved kan den bidrage til smart drift. Men det er observeret,⁴⁴ at der ved for hurtig lastændring kan opstå problemer med kondenserende kølemiddel, hvilket er ødelæggende for kompressoren i anlægget. Dette potentiale i sammenhæng med den tekniske udfordring giver dermed mulighed for udvikling af nye anlægsdesign, som vil kunne håndtere dette.

Et tredje eksempel er dynamisk drift af større varmepumper i fjernvarmesystemer. Her mangler man et overblik over, hvordan sådanne varmepumper bedst integreres i ledningsnettet. Eksempelvis er det ikke afklaret, hvor centralt eller decentralt i ledningsnettet sådanne varmepumper bør placeres. Mulighederne rummer et behov for overvejelser i forhold til såvel el- som fjernvarmenet. Det er her vigtigt, at forsk-

ningsindsatsen går hånd i hånd med demonstrationsprojekter.

Endelig er der et potentiale og behov for at udvikle de vedvarende energiteknologier med bedre integra-

tionsegenskaber, fx vindmøller som producerer mere ved lavere vindhastigheder, eller hybrid vind- og solkraftværker som udnytter de forskellige variationer i vind og sol.

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan løses udfordringer for at realisere fleksibilitetspotentiale i eksisterende anlæg?
- Hvordan løses udfordringer for at realisere fleksibilitetspotentiale i kommende anlæg, som bliver relevante inden for perioden, fx store varmepumper?
- Hvordan designs større varmepumper, så de kan indgå optimalt ift. såvel el- som fjernvarmenet?
- Hvilke nye løsninger skal findes for at nå langt højere fleksibilitet i energisystemets komponenter, både på effekt- og energiniveau?

Systemarkitektur og -styring

Siden 1980'erne er organiseringen af energisektoren forandret markant. Dette gælder især elsektoren, men også gas- og varmesektorerne samt hele bygningsområdet (opvarmning tegner sig for ca. 40 % af det samlede energiforbrug i Danmark) er blevet reorganiseret. Udviklingen er både gået i retning af langt færre distributionsenheder (fra 125 til 25-30) og i retning af langt flere enheder på andre niveauer, fx med den store stigning i antallet af husstands anlæg. Den nuværende rollefordeling i elsystemet består af:

- TSO'er for el og gas (Transmission System Operator), som er operatør af systemet og operatør samt ejer af transmissionsnetværket
- DSO'er (Distribution System Operator), som er distributionssystemoperatør, ejer af distributionsnetværket og har ansvar for målinger af forbrug
- BRP (Balancing Responsible Party), som har ansvar for balancering af forbrug og produktionsenheder
- Aggregatorer (tilknyttet en BRP), som styrer udnyttelsen af fleksibilitet
- Elhandlere
- Slutbrugere
- Producenter
- Markedsoperatører
- Fjernvarme- og kølingsektorerne
- Bygninger

Samtidig er det en vigtig pointe, at Smarte Energisystemer er mere end et intelligent el-system. Det

smarte el-system bør fremadrettet tænkes sammen med særligt gas- og fjernvarmenettet. Danmark har meget veludbyggede fjernvarme- og gasnet, og der er derfor et godt udgangspunkt for at udnytte synergier mellem de forskellige energiformer og -net. Eksempelvis kan fjernvarme- og gassystemerne bruges til at lagre el fra vindkraft i andre energiformer til senere brug, når elprisen er lav. Alternativet til at lagre el er at udveksle strømmen med udlandet. Det er dog ikke nødvendigvis altid hensigtsmæssigt, da en bedre integration af el-, varme- og gassektorerne kan medvirke til at mindske brugen af fossile brændstoffer og udgøre et supplement til biomasse i fjernvarmesektoren. Fjernkøling forventes at vokse i de kommende årtier og bliver derved en ny termisk infrastruktur, der kan konvertere og lagre energi. Herved vil den store fleksibilitet, som fjernvarmsystemerne repræsenterer i vinterhalvåret få en tilsvarende fjernkølingskomponent, som vil kunne levere en stor del af den efterspurgt fleksibilitet i sommerhalvåret.

Når vi skal nå 70 % CO₂-reduktion i 2030, vil det ikke være nok at udbygge produktionen af vedvarende energi og etablere Smarte Energisystemer. Dette kan bringe os et pænt stykke ad vejen, men for at nå helt i mål, vil vi være nødt til at inddrage de potentialer for CO₂-reduktion, som ligger i andre sektorer af samfundet. Med andre ord sektorer, der normalt ikke regnes som en del af energisektoren. Projektet, som ligger til grund for denne rapport, har afdækket, at det er

⁴⁴ Meesenburg, W., Kofler, R., Ommen, T., Markussen, W.B., Elmegaard, B., 2019. Design considerations for dynamically operated large-scale ammonia heat pumps. IIR ICR 2019. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.1203>

oplagt at kigge på transport, bygninger og processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution.

Den forventede stigning i antallet af elektriske køretøjer, private varmepumper m.v. vil resultere i forbrugsmønstre i ledningsnettet, som er meget anderledes i forhold til, hvad ledningsnettet oprindeligt blev designet til at håndtere. Denne udvikling kommer i tilgift til den øgede usikkerhed og fluktuation, der kommer i energisystemet som helhed, når vedvarende energikilder kommer til at udgøre en større andel af energiforsyningen. Det er demonstreret, at fleksibilitet i forbruget kan beskrives, så den kan udnyttes af kontrollere eller aggregatorer/markeder på systemniveau og dermed bidrage til at balancere systemet i korte tidsintervaller (1 minut - få timer).

Det er velkendt, at DSO'erne står overfor store udfordringer forbundet med elektrificeringen fx på grund af et stigende antal el-biler, varmepumper og solcel-

ler. Her er det vigtigt, at fleksibiliteten fra slutbrugere kommer i spil på en effektiv måde. Flere større projekter har vist, at markedsbaserede metoder støder på nogle udfordringer i sådanne sammenhænge, og at data-intelligent styring lader til at være vejen frem.

Når der betragtes såvel mindre geografiske områder (som fx et typisk distributionsnet) som finere tidshorisonter, vil fleksibiliteten skulle beskrives på en ny måde. Beskrivelsen skal både være dynamisk og stokastisk - det vil sige, at man tager højde for det element af tilfældighed, der uundgåeligt vil være forbundet med udsvingene i lokalt forbrug og produktion. Sådanne beskrivelser eksisterer ikke i dag. Derfor er der behov for forskning i, hvordan denne dynamiske og stokastiske fleksibilitet kan beskrives, og hvordan denne beskrivelse kan bruges til at udvikle data-intelligente styringsprincipper til eksempelvis at holde spændingsniveauet i distributionsnet. Der er også behov for at forstå, hvordan et system af kontrollere kan tilvejebringes således, at de hver for sig løser

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan forbedrer vi observérbarheden af DSO-nettet ved at anvende data fra smarte elmålere og andre datakilder med henblik på at gøre operatører i stand til at tage beslutninger i kontrolrummet? Hvordan øger vi digitaliserings- og automationsniveauet på alle niveauer i el-systemet af hensyn til at udnytte fleksibilitet, re-konfiguration af ledningsnettet mv.?
- Hvordan udvikler vi et DSO-marked, som kan fungere med andre markeder, og som skaber værdi til DSO'erne og aggregatorerne? Hvordan udvikler vi fortsat resultater, hvor vi inkluderer fx spændingsstyring og kombinerer med netværksplanlægning, som inkluderer nye typer af enheder og aktiv kontrol samt risikostyring for aggregatorerne?
- Hvordan afkobler vi systemkontrol-funktionaliteten og assets/slutbrugere med henblik på at definere kontrolfunktion-interfaces?
- Inden for området central control vs. forskellige grader af distribueret kontrol: Hvad er effekten af forskellige grader af distribueret kontrol på krav til computerregnekraft, dataudveksling og robusthed?
- Inden for området selvregulerende kontrolstrukturer: Hvordan udvikler vi distribueret kontrol med henblik på at øge robusthed? Hvordan distribuerer vi kontrol og muliggør automatisk styring af funktionaliteten af kontrolenheder, der fejler? Hvordan sikrer vi informationsintegritet og "graceful performance degradation" i tilfælde af fejl?
- Hvad er interaktionen og den gensidige afhængighed af observérbarhed, kontroleverne/aktivering, kontrolsystemer og kommunikationssystemer med henblik på at fastholde systemfunktionalitet og omkostninger?
- Hvordan skal testmetoder for aggregatorer og andre komplekse kontrolalgoritmer udvikles, så der kan gennemføres troværdige og gennemførlige tests af adfærd under normale og kritiske forhold?

et service problem (i el-systemet er det fx. frekvens, spænding, flaskehalse og balancering). Man kan fx forestille sig, at dette sker gennem såkaldt indirekte styring, hvor der sendes et prissignal til slutbrugerne. Hos slutbrugerne vil der være behov for at udvikle nye forbrugercentrerede løsninger, som fx minimerer

den samlede elregning. Batterier har mange gode egenskaber til lagring af el. Men batterierne kan gøre ekstra nytte for elsystemet ved installation i udvalgte knudepunkter for levering af systemydelser for elsystemet ud over lagring af energi.



Digitalisering, analytics, computing - samt data-intelligent styring og optimering

Et traditionelt el-system er karakteriseret ved, at produktionen følger forbruget, og derfor har fleksibilitet og optimering været foretaget på centrale enheder. I fremtidens grønne energisystem kræver en robust og effektiv integration af vind- og solenergi, at fleksibilitet og optimering flyttes til forbrugerne. Her er det vigtigt, at fleksibiliteten fra slutbrugerne kommer i spil på en effektiv måde.

Da fleksibiliteten skal mobiliseres i alle dele af samfundet og hos mange forskellige typer af forbrugere (smarte bygninger, elbiler, rensningsanlæg, væksthuse, supermarkeder, mv.), er der et behov for at undersøge, hvorledes dette spektrum af fleksibilitet bedst bringes i spil. Det skal også undersøges, hvordan det bedst bringes i spil på en måde, som sikrer, at ønsker og behov hos alle typer af forbrugere tages i betragtning. Denne mobilisering skal indeholde muligheder for sektorkobling på brugerniveau.

For at kunne mobilisere og udnytte fleksibiliteten optimalt er det nødvendigt med forskning i samspillet mellem aktører, udformningen af systemstøttefunktioner, udveksling af fleksibilitetsydelser via markeder og styringskoncepter samt styring af de enkelte fleksibilitetsenheder. Der bør ske en udvikling af koncepter som fx kontrol-teoretiske, hierarkiske/distribuerede, direkte/indirekte, transaktions-baserede og peer2peer. Der bør inkluderes, hvorledes den stokastisk natur af fleksibiliteten kan indgå i beskrivelsen af fleksibilitetsydelserne.

Der er behov for at klarlægge, hvordan fleksibilitet kan integreres i planlægning og drift, så der tages hensyn til usikkerhed på kort og lang sigt, og der er behov for at klarlægge, hvordan der kan sikres en robust drift under både normale forhold og i mere ekstreme situationer. Yderligere er det væsentligt at afklare, hvordan konfliktende behov mellem lokale og globale behov løses, og hvordan det sikres, at det er gennemsigthed i leverance af fleksibilitet og afregning.

Der er brug for forskning i metoder til karakterisering af fleksibilitet, og en karakterisering som tager højde for såvel dynamik som usikkerhed. Yderligere er der behov for forskning i, hvorledes fleksibiliteten kan mobiliseres gennem eksempelvis kontrolteoretiske og markedsbaserede metoder. Endelig er der brug for forskning i at få klarlagt fordele og ulemper ved forskellige kommunikationsløsninger i forhold til bar-

rierer for mobilisering af fleksibiliteten i alle dele af samfundet, og i forhold til at kunne respektere krav ift. GDPR og privacy.

Når der betragtes såvel mindre geografiske områder (som fx et typisk distributionsnet) som finere tidshorisonter, vil fleksibiliteten skulle beskrives såvel dynamisk som stokastisk. Der er der behov for forskning i, hvordan denne dynamiske og stokastiske fleksibilitet kan beskrives, og hvordan denne beskrivelse kan bruges til at udvikle data-intelligente styringsprincipper til eksempelvis at holde spændingsniveauet i distributionsnet.

Fleksibiliteten er en kompleks størrelse, og der kræves nye metoder til beskrivelse og modellering. Specielt er der behov for at analysere spektret af matematisk-statistiske modeller i forhold til, hvorledes de optimalt kan spille en rolle ifm. Smarte Energisystemer. Spektret af modeller består bl.a. af digital twins, cyber-fysiske modeller, rene statistiske modeller samt AI-baserede modeller. Desuden af såkaldte grey-box modeller, hvor man løbende justerer en teoretisk model ud fra indhentede data. Et nøgleproblem er at finde den optimale balance mellem model kompleksitet og anvendelser i driftssituationer, hvor krav til hurtige beregninger kan være afgørende. Desuden er der behov for forskning i, hvorledes de forskellige typer af modeller evner at optage information fra online sensorer.

Optimeringsbaseret styring tilvejebringes oftest gennem veldefinerede feedback funktioner. Men den stigende kompleksitet i fremtidens energisystemer, hvor brugerne skal spille en central rolle, betyder, at nye principper for AI-baseret optimeringsbaseret open- og closed loop kontrolteoretiske løsninger skal tilvejebringes. Disse løsninger er afgørende ift. fremtidens forbrugerbaserede energisystemer.

Fremadrettet vil beregninger i højere grad blive gennemført gennem anvendelse af Cloud-, Fog eller Edge Computing. Her mangler der en forståelse af, hvorledes de forskellige principper for beregning bedst egner sig til de forskellige opgaver for fremtidens Smarte Energisystem. Eksempelvis vil anvendelse af Edge Computing formodentlig kunne være med til at sikre GDPR og privacy hensyn.

Anvendelsen af sensorer og IoT løsninger vil stige eksplosivt. Disse løsninger vil fremover være næsten

overalt. Det er vigtigt, at disse løsninger udvikles med sigte på anvendelser også for fremtidens Smarte Energisystem. Specielt er der behov for sensorer med en passende opløsning og en responstid, som er afbalanceret med de behov for stabilitet og styringer, vi ser i fremtidens energisystem. Sensor og IoT løsninger bør i højere grad blive koblet til diverse be-

regningsplatforme, og eksempelvis vil visse sensorer og Edge Computing kunne tilvejebringe autonome løsninger, som kan sikre energiforsyningen i tilfælde af kriser eller angreb udefra. Løsninger skal derfor også ledsages af forskning i sikker kommunikation og computing.

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan får vi gennem AI og data-intelligente metoder frembragt den nødvendige fleksibilitet på en samfundsmæssig effektiv måde?
- Energieffektivitet er stadig meget vigtigt. Men hvordan får vi etableret data- og evidensbaserede mål for energieffektiviteten til afløsning for de nuværende tabelbaserede?
- Hvordan kan spektret af data-intelligente modeller klassificeres ift. anvendelser - herunder anvendelser i realtid og til anvendelse af løbende sensorsignaler?
- Hvordan kan spektret af moderne beregningsprincipper bedst bringes i spil ifm. fremtidens Smarte Energisystem?
- Hvordan skal sensor og IoT løsninger udvikles og udformes for fremtidens energisystem?
- Hvordan kan der udvikles nye metoder til data-intelligent styring, hvor eksempelvis AI og reinforcement learning (en disciplin inden for Machine Learning), bringes i anvendelse for at udvikle nye løsninger?
- Hvordan undersøge samspillet mellem IoT, computing og sensorer med formålet at kunne udvikle en ny generation af energisystemer, som er fejltolerante og robuste, og som kan indgå i et dynamisk mix af decentrale og centrale hierarkiske løsninger?
- Hvilke metoder er bedst til at fremme deling af information, og hvilke metoder er bedst til at gøre anvendelse af informationen, fx gennem datamarkeder, åbne datatilgange etc.?
- I lyset af udviklingen af energisystemer og digital lagring hvad vil da være den rette balance mellem centraliseret og decentraliseret drift og markeds- og kontrol-baserede tilgange?

Fremtidens Smarte Energisystem skal sikre en kobling mellem enheder på alle spatielle niveauer - fra vaskemaskinen til de globale energimarkeder. Desuden skal drift af systemet sigte mod robust drift og balance på alle tidsmæssige horisonter fra sekunder til dage. Dette faciliteres i dag af markeder på forskellige horisonter, men i fremtiden vil der være behov for at kunne mobilisere fleksibiliteten hos slutbrugerne og på et aggregeringsni-

veau, hvor det ikke vil være muligt eller hensigtsmæssigt at opstille et konventionelt marked med bud og clearing. På dette niveau vil dynamikken og stokastikken - det vil sige tilfældige variationer - spille en væsentlig rolle. Dette fordrer nye digitale markeds løsninger, som eksempelvis gennem udstrakt brug af kunstig intelligens, koblede kontrolsystemer og IoT-enheder kan bringe fleksibiliteten i spil på alle niveauer.

Rammebetingelser

Tariffer og afgifter

For fremtidig fleksibilitet i Smarte Energisystemer er en altdominerende problemstilling at sikre, at alle typer af forbrugere får et økonomisk incitament til at agere fleksibelt eller investere i teknologi og apparater, der kan sikre automatisk reaktion. Dette indebærer, at faste priser, faste tariffer og specielt abonnementsordninger er meget uhensigtsmæssige og bør undgås.

Det har længe været fremhævet, at de faste tariffer og skævvridende energiafgifter er det altoverskyggende problem i forhold til at komme i mål med den grønne omstilling på en omkostningseffektiv måde (se fx Smart Grid-Strategi rapporten fra 2013).^{45,46}

Energiafgifter

Klimarådet har anbefalet en grundlæggende revision af det danske afgiftssystem ud fra et hensyn om at skabe et nyt, enklere og bedre afgiftssystem.⁴⁷ Parallelt har andre projekter arbejdet med forslag til revision af afgiftssystemet.⁴⁸

De nuværende afgifter er generelt konstante, men forskellige mellem de forskellige energiformer, og forbrug (eksempelvis om det er processtrøm eller strøm til opvarmning). For den private sektor har de nuværende konstante afgifter tjent til at prioritere energibesparelser; men for fremtiden er det vigtigt at få etableret nogle afgifter, som også kan tjene til at accelerere den grønne omstilling. Også i det brede

energiforlig fra sommeren 2018 blev det vedtaget, at såkaldte dynamiske afgifter (afgifter som er koblet til CO₂-udledning) skulle undersøges nærmere. Dette forekommer at være vejen frem, idet fornuftigt designede afgifter vil være facilitator for en acceleration af den grønne omstilling og grøn vækst.

I Danmark skal vi sikre, at der er lige konkurrence ift. CO₂-beskatning imellem energiformerne. Fossile brændsler vil have en konstant CO₂-udledning og derfor en konstant (høj) afgift i det foreslåede afgiftssystem. En høj CO₂-afgift vil tilskynde til at reducere elforbruget, når CO₂-aftrykket fra elproduktion er højt og øge elforbruget, når CO₂-aftrykket er lavt.

Det er en general anbefaling, at afgifterne kobles til de aktuelle fysiske forhold, herunder til den tidsmæssige variation i CO₂-udledningen.

Energiafgifterne bør harmoniseres mellem energiformerne og forbrugsformerne. Afgifterne bør designes således, at der er en fast del, som giver incitament til energibesparelser, og en variabel del, som giver incitament til fleksibilitet. Afgifterne skal kunne skaleres således, at et ønsket provenu opnås. Eksempelvis skal de kunne være provenu-neutrale ift. ændringer.

Det anbefales også, at energiafgiften over en kortere årrække harmoniseres på tværs af sektorer. Det vil være uheldigt, såfremt industriproduktionen får et

⁴⁵ Klima-, Energi- og Bygningsministeriet (2013): Smart Grid-Strategi - fremtidens intelligente energisystem.

⁴⁶ At dømme på følgende passage i Statsministerens tale til åbningen af Folketinget i oktober 2019 - "I årtier blev den grønne udvikling drevet frem af lovgivning fra Christiansborg. Vindmøller. Økologi. Energieffektivitet. Nu er andre - de unge, erhvervslivet - langt foran os. Vi skal foran igen." - synes også regeringen at være optaget af, at relevant lovgivning driver den grønne omstilling frem.

⁴⁷ Klimarådet (2020): Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion. Rapport.

⁴⁸ Se bl.a. Cities Taskforceudvalg om energiafgifter og rammebetingelser, august 2019: "Energiafgifter for fremtiden".

incitament til at flytte til mere CO₂-belastende områder. Så dette skal foregå under hensyntagen til industriens internationale konkurrenceevne.

Industrien skal hjælpes til at blive fleksibel, energieffektiv og, hvor det giver mening, elektrificeret. Målet er at accelerere den grønne omstilling i industrien gennem en gradvis indførelse af CO₂-afgifter. Dette kan eksempelvis ske som foreslået af Klimarådet.⁴⁹

Det er her vigtigt, at der udvikles et sammenhængende system for CO₂-afgiften, som sikrer, at internationalt konkurrenceudsatte industrier kompenseres for de højere omkostninger som følger af en højere CO₂-afgift.

Nettariffer

Nettariffer er den omkostning, som kunderne i energisystemet betaler for levering af energi gennem forsyningsnettet. Nettet anvendes til drift, investering og vedligeholdelse af netinfrastrukturen, og dens størrelse skal afspejle disse omkostninger.

De nuværende nettariffer er typisk enten faste pr. leveret energienhed eller koblet til tidspunktet på døgnet (ToU - Time-of-Use tarif). De tidsdifferentierede tariffer er introduceret for at give incitament til at sprede forbruget væk fra timer med høj belastning og derved bl.a. udskyde nødvendige opgraderinger af nettet. Men optimal udnyttelse af netkapaciteten bliver i fremtiden et mere dynamisk problem, fx i takt med at større dele af forbruget vil reagere på varierende energipriser. De tidsvariable tariffer kan dog muligvis føre til utilsigtede variationer i belastningen af elnettet, men de kan ved fornuftigt design også være med til at afhjælpe de problemer, man kan frygte eksempelvis ved stor lokal og decentral produktion.

De nettariffer, som den enkelte kunde betaler, bør i princippet afspejle den andel af omkostningerne til nettet - på det aktuelle tidspunkt og de aktuelle steder i nettet - som de giver anledning til. Derved sikres økonomisk efficiens. Der kan dog også være modsatrettede hensyn om fx solidaritet mellem kunderne. Eksempelvis kan det være u hensigtsmæssigt, at en kunde, der er forsynet gennem et svagt net, der skal opgraderes, når elforbruget stiger, skal betale mere end en nabo, der er forsynet gennem et stærkt net, der ikke skal opgraderes ved et tilsvarende øget forbrug. Der er dog fortsat behov for at udvikle på

tarifferne, især baseret på de nye muligheder digitaliseringen giver fx baseret på timeafleste målere og nye sensorer. Som led i nye tarifferingsmodeller bør det undersøges, hvorvidt der kan sikres stabilitet i forhold til netbelastningen, hvis forbrugerne reagerer på dynamiske tariffer, og hvorledes nettarifferne kan spille sammen med andre elementer, herunder nye styringskoncepter, energimarkeder, markeder for fleksibilitet osv.

Sammenfattende er der således behov for yderligere forskning i, hvorledes tariffer kan designes, og hvordan de virker i praksis, når adfærdsvirkning tages i betragtning sammen med fx muligheder for mere digitalt baserede styringsløsninger og markeder.

Testzoner for udvikling og test af rammebetingelser

For at nå 100% grøn omstilling kræver det et andet syn på, hvordan markedselementer spiller sammen, herunder rammebetingelser. Det Grønne vækstteam har understreget vigtigheden af markedsdrevet udvikling. Dog er der behov for viden om, hvilke incitamenter og rammebetingelser, der vil understøtte de teknologiske løsninger bedst muligt og skubbe udviklingen i den rigtige retning med størst mulig hastighed.

Derfor er forslaget, at nye og ændrede rammebetingelser kan testes i beskyttede zoner. Senest har Energistyrelsen (oktober 2019) foreslået en ramme for at lave aftaler vedrørende regulatoriske testzoner (benævnes også frizoner). Udkastet er en konsekvens af Energiaftalen fra juni 2018, som lagde op til "test af regulatoriske frizoner".

Interessen for udnyttelse af test og demonstrationer forstærkes af, at Danmark rummer en række af de energiteknologiske virksomheder, som vil kunne levere mange af de basale teknologiske løsninger til et fremtidigt Smart Energisystem både nationalt og internationalt. Danmark er langt fremme i forhold til integration af fremtidens vedvarende energikilder såsom vind og solenergi. Ligeledes findes der veludbyggede el-, gas-, vand- og termiske net, som betyder, at Danmark med fordel kan agere demonstrations- og testområde for fremtidens grønne løsninger. Flere lokaliteter er blevet anvendt som testområder inden for eksisterende reguleringer. Næste skridt er, at testområder som disse også kan teste alternative

⁴⁹ Klimarådet (2020): Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion. Rapport.

forretningsmodeller baseret på ændrede rammebetingelser. Det er vigtigt, at flere forskellige løsninger kan demonstreres i et integreret samspil. Der er især behov for nyudvikling, når det gælder samspillet mellem løsningerne.

Anbefalinger fra Vækstteam for grøn energi- og miljøteknologi i rapporten "Danmark som frontløber i den grønne omstilling" (januar 2019)⁵⁰ nævner blandt andet, at det bør være målsætningen for Danmark at komme frem i førerfeltet i forhold til digitaliserede energisystemer. For at optimere og skabe et fleksibelt forbrug og produktion med større mængder vedvarende energi i systemet, er der behov for data og datastrømme mellem sektorer for at kunne skabe intelligente demand response-systemer. Der er derfor behov for, parallelt med etablering af egentlige testzoner, at etablere platforme for data-management, som uvildigt kan danne datagrundlag på tværs af projekter og testzoner. En sådan platform giver mulighed for at anvende vigtige data i realtid som fx vejrforhold, produktion, forbrug, energipriser m.m. – uafhængigt af geografisk lokalitet.

Det er vigtigt, at testzoner udformes således, at hele spektret af rammebetingelser og regler kan testes ud

fra et privatøkonomisk og samfundsøkonomisk perspektiv, samtidig med at gode resultater fra testzoner kan bringes i spil i samfundet.

I forhold til valg af testzoner er det afgørende, at de er både repræsentative og skalérbare:

- Repræsentativiteten skal sikre, at testede (og godkendte) rammebetingelser kan bringes forsvarligt i spil i hele samfundet.
- Skalérbarhed skal sikre, at den målte effekt er troværdig, hvilket blandt andet betyder, at perioden for testforløbet ikke må blive alt for kortsigtet.

Disse punkter skal sikre, at resultaterne af tests er så pålidelige og præcise, at de gunstige resultater 1) giver input til ændringer af markeder, reguleringer og incitamentstrukturer og 2) efterfølgende kan udrulles i hele samfundet.

Vi har også brug for testforløb, som såvel tidsmæssigt som omfangsmæssigt gør det muligt at etablere en fornuftig business case for de deltagende firmaer. For at imødekomme alle disse krav har vi brug for såvel geografiske som tematiske testzoner.

Forskningsspørgsmål:

- Hvorledes skal nye afgiftsstrukturer designs for at understøtte effektivitet og fleksible løsninger under hensyntagen til forbrugerbeskyttelse?
- Hvordan kan tariffer, der er dynamiske i tid og/eller sted, konstrueres økonomisk efficient, og således at fleksibilitet i forbruget kan bidrage til optimering af netbelastningen, uden at der opstår ustabilitet?
- Hvordan kan kundernes fleksibilitet mest hensigtsmæssigt aktiveres gennem dynamiske tariffer, fleksibilitetsmarkeder eller på anden vis således, at netkapacitet udnyttes optimalt, uden at der opstår ustabilitet?
- Hvordan designs såkaldte aggregatorer for en effektiv kobling til markederne?
- Hvordan vælges optimale testzoner for at sikre repræsentativitet?
- Hvordan skaleres test i de regulatoriske testzoner for at opnå pålidelige udsagn?
- Hvordan udformes testzonerne, således at alle væsentlige barrierer i rammebetingelser bliver afdækket?
- Hvordan reagerer forskellige forbruger-segmenter i praksis på variable priser, og hvorledes vil variable priser påvirke væksten i og forbrugsprofilen for de nye elforbrugskategorier?

⁵⁰https://em.dk/media/12935/danmark-som-frontlober-i-den-gro-nne-omstilling_web_accessible.pdf

Cybersikkerhed og robusthed

Cybersikkerhed

Ifølge EU's indeks for digitalisering⁵¹ er Danmark det mest digitaliserede EU-medlemsland. Alligevel fremstår data for kombination af energiformer og data for kombination af forskellige energiformer og sektorer som af relativt lav kvalitet og som fragmenterede.

Oveni købet gælder det, at elforsyningselskaberne ifølge lovgivningen møder barrierer ifm. at samkøre data med andre aktører bl.a. på grund af de regelsmæssige rammer. Ligeledes vil hensyn til privacy og data-etik få endnu større opmærksomhed, når data får større betydning. Her er det vigtigt at udvikle tekniske værktøjer og juridiske aftaler, der regulerer deling og samkørsel af data.

Med voksende betydning af data følger også større risiko for cyberkriminalitet. Dermed får cybersikkerhed stigende vigtighed.

Det er velkendt, at organisationers evne til at optage og anvende teknologi⁵ har betydning for effekten af en given teknologi. Også i tilfældet med digitalisering af Smarte Energisystemer skal der derfor arbejdes med denne barriere.

Det er også bredt erkendt, at markedsmodeller, der kan muliggøre fuld integration på tværs af aktører i det distribuerede energisystem, endnu ikke er udviklet. Konsekvensen er, at selvom data faktisk blev delt, vil de nødvendige transaktioner ikke kunne ske eller i hvert fald blive hæmmet. Specielt er der eksisterende rammebetingelser, som virker som en bremseklo på ift. en intelligent og effektiv sammenkobling af nettene.

Ikke overraskende er meldingen fra aktørerne i sektorudviklingsprojektet derfor også, at håndtering af

spørgsmålene om cybersikkerhed og privacy skal have meget høj prioritet fremadrettet.

Energisystemer er kritisk infrastruktur, og systemfejl kan have store omkostninger for samfundet. Fx påvirker strømafbud millioner af borgere med øjeblikkelig virkning. Derfor sættes der høje standarder for forsyningssikkerheden.

Energiplanlægning, produktion og distribution og målinger bliver i voksende omfang digital. Dette medfører nye cybersikkerhed risici, som kommer oven i de allerede velkendte risici i traditionelle energisystemer. Smarte Energisystemer kan gøres mere robuste ved, at der tages højde for cybersikkerhed ved designet. Her kan der trækkes på disciplinen cybersystem-design.

Initiativer om sikkerhed og driftssikkerhed har bidraget til at gøre elforsyningen mere sikker i dag. Det gælder bl.a. identitets- og adgangsstyring, sikker kommunikation, sikkerhed/privacy-by-design, layered control systems, decentralisation og compartmentalisation, fail-over, redundancy og failsafe mechanisms. Ved at designe cybersystemer med øje for potentielle trusler, konstruerer vi den digitale rustning for energisystemet, så den er lige så stærk som den fysiske del af systemet.

Kernen i at bygge et cybersikkert Smart Energisystem er at begynde med at forstå cybertrusler, potentielle sårbarheder og direkte og indirekte angrebsmål og mekanismer. På baggrund af en sådan forståelse skal der udvikles cybersikkerhed teknikker og organisatoriske og ingeniørmæssige metoder målrettet den pågældende organisation og infrastruktur. Cybersikker-

⁵¹ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>

hed teknikker såsom adgangskontrol, authentication, anomaly og intrusion detection og logging af sådanne hændelser er blot en del af en større strategi, der skal udvikles med henblik på at cybersikre Smarte Energisystemer.

Som nævnt i Grøn Vækst rapporten fra januar 2019,⁵² er energisektoren i Danmark ikke på forkant med hensyn til digitale teknologier. Det skyldes bl.a. en konservativ tilgang til hastigheden, hvormed den optager og anvender nye digitale teknologier. Det gælder også, at return on investment (ROI) i energisektoren er lav og sker over lang tid. Konsekvensen af dette er, at udstyr typisk er i drift meget længere end anden informations- og kommunikationsteknologi. Dette skaber udfordringer for leverandører af traditionel IT-hardware og software, fordi de er vant til teknologiske livscyklusser, der tælles i år og ikke i årtier. Herudover gælder det, at kontrolkomponenter (OT) typisk konstrueres med en længere livscyklus og support fra leverandøren. Her er det et problem, at leverandørerne ikke har meget erfaring med formelle metoder til at opdatere kontrolkomponenter (PLC) på sikker vis.

Truslen om nedbrud i energiforsyningen forårsaget af cyberangreb vokser gradvist som flere og flere industrialiserede lande udvikler metoder og teknologier til offensive cyberangreb. Som et eksempel anses cyberangrebet i december 2015 mod det ukrainske ledningsnet som det første kendte succesfulde angreb. Angreb kan også gennemføres af kriminelle organisationer som fx cyberangrebet i maj 2019, der lagde det offentlige computernetværk i Baltimore ned.

Den uhellige alliance mellem cyberkrigsførelse, cyberterrorisme og cyberkriminalitet, som truer fremtidige Smarte Energisystemer stiller krav om udvikling af nye løsninger, fordi store dele af denne infrastruktur er baseret på systemer, som kombinerer traditionelle informations- og kommunikationsteknologier og kontrolsystemer (OT). Sådanne hybride ICT/OT-systemer forudsætter udvikling af nye teknikker og teknologier til at analysere og verificere sikkerhedstilstanden af det Smarte Energisystem.

På længere sigt vil udviklingen af quantum computere (inden for 15-30 år) muligvis sætte størstedelen af de kryptografiske algoritmer, som aktuelt beskytter

internetkommunikation, ud af kraft. Konsekvensen af dette er, at Smarte Energisystemer skal designes, så de kan sikkerhedsopdateres hurtigt.

Angreb på energisystemerne med kriminelle formål eller for at udløse kaos er en ting. En anden er, at systemerne kan være sårbare over for trusler, som måske ikke påvirker samfundsordenen, men kan være alvorlige for enkeltpersoner. For eksempel hvis personoplysninger kommer i forkerte hænder.

Spørgsmålene om cybersikkerhed, privacy og ejerskabet til data i energisystemet kan måske umiddelbart synes perifere i forhold til udviklingen af selve energisystemerne, men de må ikke undervurderes. Danmark er et af de lande, hvor borgerne har mest tillid til myndighederne. Herunder ligger, at borgeren har tillid til, myndighederne benytter data om borgeren til samfundsgavnligt formål og samtidig sikrer mod bevidst og ubevidst misbrug af persondata. Denne tillid er det vigtigt at værne om. Samtidig er det lovpligtigt at beskytte persondata i henhold til GDPR-direktivet.

Det er vigtigt, at disse udfordringer adresseres i tide, så de ikke bliver stopklodser for udviklingen af Smarte Energisystemer. Det er vigtigt, at forbrugernes data og privatliv beskyttes. I det hele taget bør forbrugernes rettigheder og behov spille en større rolle i planlægningen af energisystemet, end det er tilfældet i dag.

Samtidig er det vigtigt, at aktørerne i energisystemet får mulighed for at tilgå de data, der er relevant for effektivt at drive et fleksibelt energisystem med en høj andel af vedvarende energi. Det fulde potentiale i digitaliseringen kan således kun udnyttes til at skabe Smarte Energisystemer, hvis der bliver åbnet for anvendelse af data på tværs af branchens aktører. Det forudsætter, at man får afklaret en række spørgsmål omkring mulighed for tilgang til data. Det gælder i høj grad om at skabe løsninger, hvor man sikrer forbrugerens kontrol over egne data samt beskyttelse af forbrugerens privatliv, men samtidig gør det muligt for de relevante aktører i branchen at udnytte data til at fremme det overordnede samfundsmæssige mål om at omstille sektoren til bæredygtige, vedvarende energikilder.

⁵² https://em.dk/media/12935/danmark-som-frontlober-i-den-gro-nne-omstilling_web_accessible.pdf



Forskningsspørgsmål:

- Hvordan kan vi udvikle Smarte Energisystemer, der er tilstrækkeligt robuste mod cyberangreb?
- Hvordan kan vi specificere, analysere og udvikle sikre hybrid ICT/OT-systemer?
- Hvordan kan vi integrere eksisterende (ikke-sikre) legacy komponenter i Smarte Energisystemer?
- Hvordan kan vi udvikle infrastruktur med tilstrækkelig compartmentalisation, fall-back mechanisms og assets med henblik på at gøre infrastrukturen immun og isoleret over for cyberangreb?
- Hvordan kan vi opdage og helt udslette cyberangreb mod Smarte Energisystemer i real-tid?
- I hvilken udstrækning er cybersikkerhed og sikkerhed af Smarte Energisystemer en sektor-udfordring, og i hvilket omfang er det et internationalt, nationalt og/eller transsektorielt ansvar?
- Hvordan kan vi udvikle Smarte Energisystem arkitekturer, som kan opdateres sikkert og opgraderes, så de kan håndtere fremtidige udfordringer forbundet med cybersikkerhed?
- Hvordan kan vi udvikle Smarte Energisystemer arkitekturer, der er quantum computer sikre?
- Hvilke designparametre er vigtige ift. at opnå robuste systemer?
- Hvilke designparametre for kommunikation er vigtige for at respektere privacy og GDPR?

Robusthed

Robusthed af energisystemer kan defineres som systemets evne til at modstå og reducere omfanget af og varigheden af forstyrrende hændelser. Desuden som systemets evne til at forudsige, absorbere, tilpasse sig til og/eller hurtigt at nå tilbage til høj forsyningssikkerhed igen.

Med en udvikling i retning af et Smart Energisystem melder der sig en hel række af forandringer, der udfordrer robustheden af energisystemer:

- Drastiske ændringer i energisystemets dynamiske karakteristika resulterer i mere fluktuerende driftsbetingelser med det resultat, at de almindeligt anvendte off-line tilgange til at sikre driftssikkerhed af systemet ikke længere er tilstrækkelige
- Når energiproduktionen bliver afhængig af de gældende vejrforhold, øges sårbarheden over for ekstremt vejr og solstorme både for DSO'er og TSO'er
- Mange af løsningerne, som er nødvendige for en succesfuld storskala integration af vedvarende energi og Smart Grid løsninger er afhængig af pålidelig datakommunikation, hvilket i mærkbar grad øger sårbarheden over for cyberangreb
- Med ny teknologi og enheder, som anvendes i forbindelse med integration af vedvarende energi, følger nye og endnu ukendte kilder til ustabilitet, som kan udfordre robustheden af systemet

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan kan effekten af forstyrrende hændelser på driftssikkerhed forudsiges, og hvordan kan effektive tiltag identificeres, så ustabilitet kan undgås, ved at udvikle metoder (*Wide-Area/Big Data*) som vurderer systemets driftssikkerhed og robusthed i realtid?
- Hvordan kan horisonten for realtids stabilitets- og sikkerhedsvurderinger udvides ved at integrere forecasting for katastrofevurdering og reduktion af skadevirkninger?
- Hvordan kan udvikling af et avanceret adaptivt kontrol- og beskyttelsessystem øge systemets evne til at modstå og reducere omfang og størrelse af forstyrrende hændelser?
- Hvordan kan for eksempel *adaptive emergency load shedding schemes* eller adaptive beskyttelsesrelæer, som tillader midlertidig overbelastning, hvis en nødstilstand er identificeret, og effektive modforanstaltninger, bringes i anvendelse for at modstå effekten af de forstyrrende hændelser?
- Hvordan kan mulige nye kilder til ustabilitet, som kunne true systemets robusthed, tidligt identificeres ved grundig vurdering og undersøgelse af nye teknologiers påvirkning af et fremtidigt system?
- Hvordan kan en forsat forskningsindsats inden for Smart Grid teknologier, som fx demand side management og microgrid island operations, resultere i løsninger der direkte bidrager til øget robusthed af systemet?
- Hvordan kan et hierarki af kontrolbaserede metoder medvirke til løsninger af fremtidens udfordringer?
- Hvordan kan systemets robusthed øges ved forsat forskning og udvikling af smartere vedvarende energi generation, som resulterer i kontrol og regulerings services (fx black-start capability, fast frequency support, harmonic damping etc.)?

Nye modeller til optimering af investeringer og drift

Fremtidige energisystemer kræver øget fleksibilitet for at drage fordel af variable vedvarende energiresourcer såsom vind og sol med iboende variation og usikkerhed. Fleksibilitet er påkrævet både på kort sigt inden for timer og sekunder, hvilket sikrer balance og modstandsdygtighed i energisystemet og på længere sigt mellem sæsoner for at levere energitjenester, når der mangler energiforsyning. Fleksibilitet kan tilvejebringes gennem fleksibel produktion og forbrug eller gennem lagre og/eller transmission. Fleksibilitet kan også leveres af anden eksisterende infrastruktur, fx varme, gas, transport og vandsystemer.

Det kræver imidlertid en optimal koordinering mellem disse sektorer og elsystemet. Et eksempel er den koordinerede aktivering af anlæg på grænsefladen mellem energisystemer, fx kraftvarmeproducenter og gasfyrede kraftværker. Et andet eksempel er at drage fordel af lagret varme/gas i nettene (linepack) for at give el-systemer fleksibilitet. Energisystemmodeller kan hjælpe med at optimere drift og investeringer på tværs af energisektorer, hvis de videreudvikles til at tage disse udfordringer og synergier i betragtning.

Forskningsspørgsmål:

- Hvordan modellerer man kortsigtet fleksibilitet i forbindelse med langsigtet planlægning af energisystemer - planlægning af investeringer såvel som af markeder og regulering?
- Hvordan udfører man optimal netværksplanlægning med henblik på fleksibilitet og tværsektoriel kobling?
- Hvordan optimeres koordinering og udnyttelse af synergier mellem energimarkeder - på tværs af sektorer og mellem operatører?
- Hvordan sikres feasibility og optimalitet i realtids beslutningstagning på både DSO- og TSO-niveauer? Sammenhæng mellem planlægning med fokus på forskellige tidsintervaller og geografisk skala?
- Hvad er de "markedsbaserede" løsninger for at bringe de fleksible ressourcer på markedet? Har vi brug for nye markedsprodukter eller spillere? Eller kræves ekstreme løsninger som ny udformning af markeder?
- Hvordan integreres de fleksible ressourcer optimalt i de eksisterende markeder, samtidig med at man sikrer tilfredsstillende af økonomiske markedsegenskaber (såsom effektivitet, individuel rationalitet, indtægtsmæssig tilstrækkelig karakter)?
- Har de nuværende systemer brug for ekstra lag af transaktioner mellem energisektorer for at muliggøre den maksimale fleksibilitet (fx ved datadeling eller handel)?

Integration af konverterings- og lagringsteknologier

Et fremtidigt energisystem, der er bæredygtigt såvel med hensyn til udledninger, forbrug af ressourcer som i økonomisk forstand, kræver markante forbedringer af de indgående energikonverterings- og lagringsteknologier. Et vigtigt aspekt omkring energikonverterings- og lagringsteknologier er deres omkostninger. Der er en tendens til, at de forskellige teknologier, som tilbyder fleksibilitet, alle har forventning om at kunne basere sig på billig vindkraft, hvilket dog ikke vil blive tilfældet. Dette skyldes dels, at der vil være en række teknologier, som vil konkurrere om timerne med de lave priser, og dels at den øgede fleksibilitet i systemet af sig selv vil udjævne priserne og dermed fjerne de billige timer (teknologierne vil kannibalisere deres eget marked).

Ser man specifikt på integrationsaspekterne for disse i et Smart Energisystem, er de vigtige forskningsmål at fastslå de præcise krav til teknologierne i forhold til de services, de skal levere, herunder den krævede effektivitet, lagerstørrelse, tider samt responstider.

Når disse behov/krav baseret på udvalgte scenarioanalyser er undersøgt, er det derefter vigtigt at lave en teknoøkonomisk beregning, der tillader en "benchmarking" mellem forskellige teknologier for herigennem at identificere de mest lovende teknologier såvel som sektorkoblinger, der bør udvikles yderligere gennem forskning og derefter markedsmodning.

Forskningsspørgsmål:

- Hvilke responstider og hvilken regulerbarhed skal nye energilagings- og konverteringsteknologier have, for at kunne integreres i fremtidens Smarte Energisystem baseret på 100 % vedvarende kilder? Dette bør undersøges gennem systemmodellering af hele energisystemet, og både langtids- og korttidslagringsbehovet skal kendes. Såvel termisk som kemisk energilagring (batterier og "Power-to-Gas"-løsninger) bør analyseres.
- Hvilke energikonverteringsteknologier er de mest lovende, og derfor dem der skal satses på? Dette kan undersøges gennem en teknoøkonomisk gennemgang med særlig fokus på sektorkoblinger og konverteringsteknologier, der tillader konvertering af store mængder af elektrisk energi til services i transportsektoren og til bolig-opvarmning/køling. For transportsektoren omfatter dette brug af el-dreven transport (BEV) samt analyse af diverse bæredygtige brændstoffers rolle, og for boligopvarmnings-siden en analyse af forskellige teknologivalg specifikt med fokus på varmepumper.
- Hvilken vej skal vi for at komme i mål med det bæredygtige energisystem? Det er essentielt at opstille et roadmap for integration af nye konverterings og lagringsteknologier, for at belyse hvilke teknologier vi har behov/mulighed for at integrere i fremtidens Smarte Energisystem og hvornår. På kort sigt tages udgangspunkt i eksisterende teknologier, men det er vigtigt ikke at være låst til disse, når fremtidige teknologier bliver billigere og pålidelige nok til at integrere på stor skala i systemet.



Sektorkoblingsmodellen og 6 forslag til at mobilisere fleksibilitet og reducere CO2-udledning

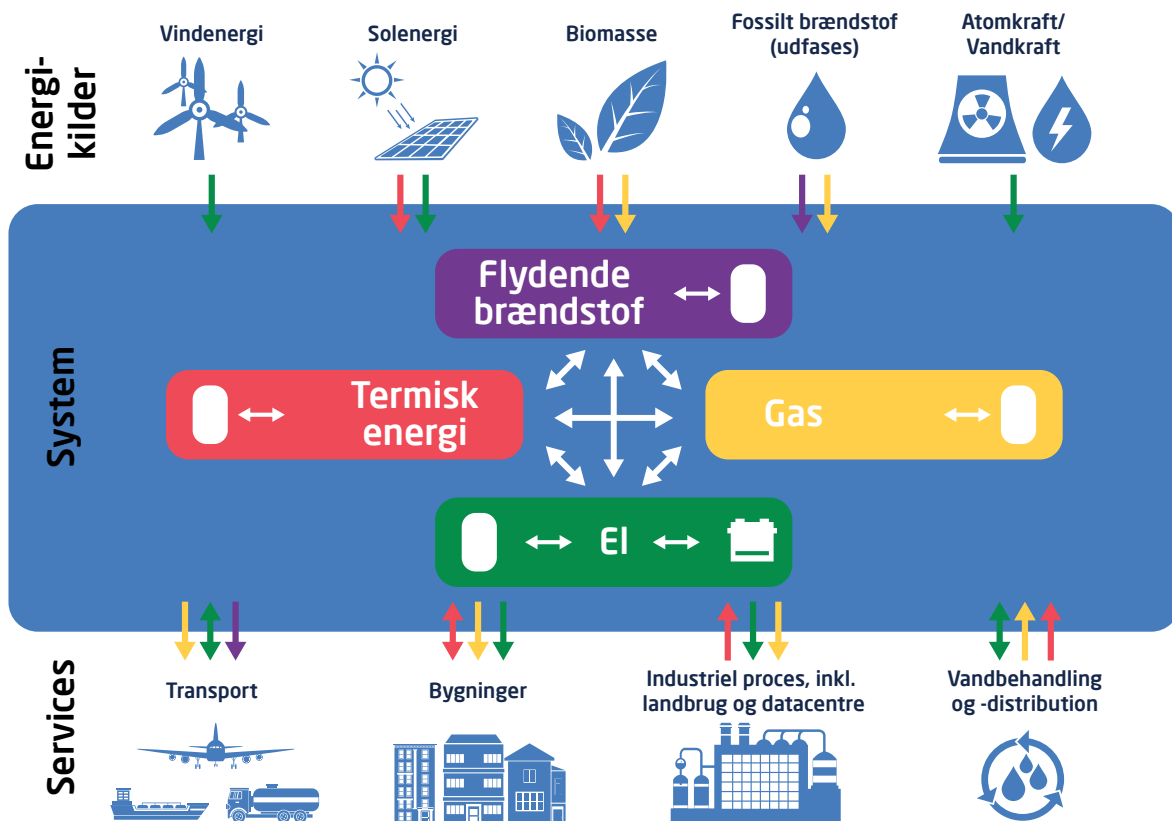
Sektorkoblingsmodellen

I sektorudviklingsprojektet er der udviklet en sektorkoblingsmodel (se Figur 7), der tager udgangspunkt i, at udviklingen af Smarte Energisystemer skal tage højde for flere niveauer. Det fremtidige energisystem vil i høj grad være baseret på fluktuerende energikilder som vind og sol. Målet er dels en CO2-reduktion og samtidig et mål om 100 % vedvarende energi. Der vil være forskellige løsninger afhængig af geografi og nuværende energisystem. Modellen illustrerer det globale energisystem.

Transformationen går fra tidligere produktion primært baseret på styrbart, kontrolleret og stabil produktion imod primær produktion baseret på ikke-styrbare produktion. Der kan være tale om både sæsonudsving og daglige udsving.

For at løse udfordringer om sæsonudsving vil der dels være fokus på konvertering mellem energiformer samt indførelse af "buffere" med flere forskellige lagringsteknologier. Dette er illustreret i den midterste

Figur 7. DTU Sektorkoblingsmodellen



ring, hvor sammenhængen og sammenbindingen ses. Den tætte koordinering på tværs vil optimere behovet for den samlede mængde energi i systemet samt minimere behovet for at have nok installeret kapacitet til rådighed.

En anden måde at løse udfordringen med fluktuerende produktion på er ved at gøre forbruget styrbart. Der findes flere løsninger til at justere behovet hos brugerne, og den nye tankegang er at tænke i services – dels den energiservice samfundet har brug for og dels at tænke i den service, som samfund og forbrugere kan levere til systemet for optimering af systembalance på sekund-, time- og døgnbasis. En yderligere mulighed er at tilvejebringe et hierarki af automatiske løsninger, som løser de forskellige udfordringer i nettet, og som leder til nogle effektive prissignaler, som sendes til den fleksible forbruger.

Endnu et andet middel til optimering af systemet er lokal produktion hos forbrugeren – det såkaldte ”prosumer”-begreb. Kan man optimere lokalt, mindske presset på den samlede transmission og distribution i systemet. Endvidere betragter vi alt forbrug som en del af det samlede energisystem, dvs. al transport, bygninger, industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre) og i vanddistribution og -behandling.

De fem lag i Smarte Energisystemer

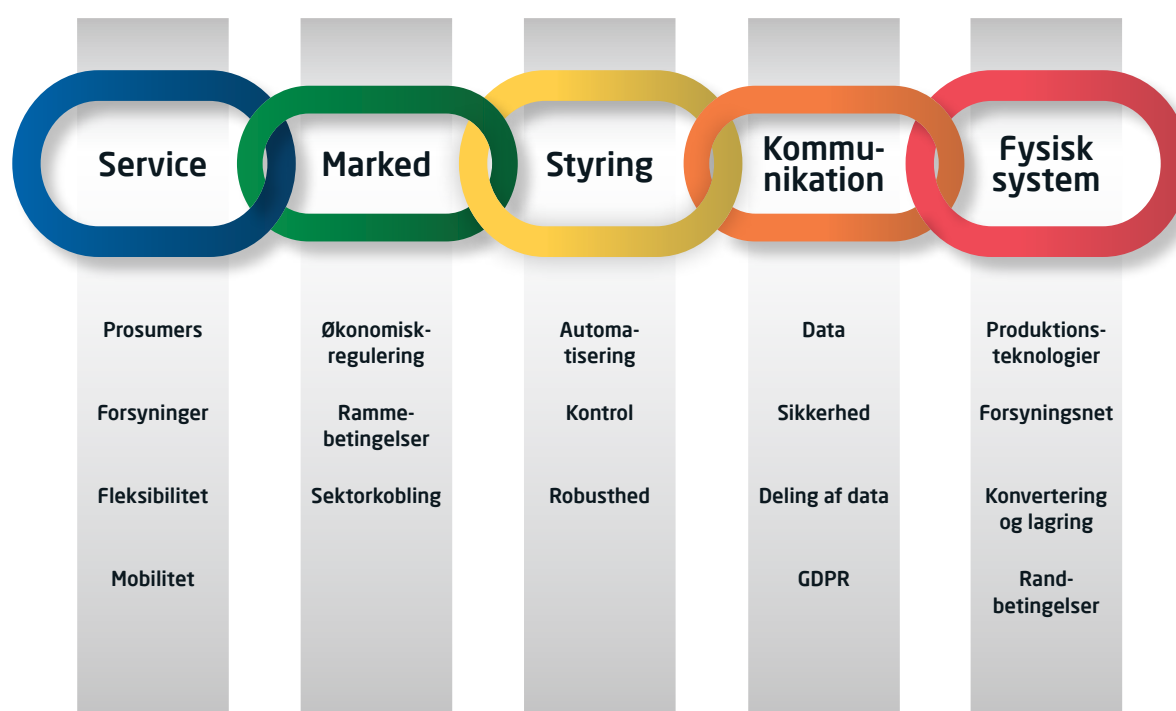
For at optimere og håndtere et så komplekst system skal der udvikles intelligent styring og kommunikation. Det kræver brug af data, datahåndtering og datakommunikation samt nye intelligente automatiske demand-respons styringsteknologier.

Transformationen vil stille store krav til den måde, vi har tænkt forsyning på. Dels kræver det fleksibilitet overalt i systemet – både på sæsonniveau og på de helt korte tidsintervaller. Ud over det fysiske system, er der flere niveauer, der skal udvikles og modnes, for at det fulde potentiale i det fremtidige Smarte Energisystem kan udnyttes (se Figur 8):

- **Service (Prosumer og Utilities)**
- **Markeder/Business cases/Regulering**
- **Kontrol og digitalisering**
- **Data og Kommunikation/styring**
- **Fysiske system (komponenter og infrastruktur)**

”**Service (Prosumer og Utilities)**” kan fx være en service til en forbruger, leverance af fleksibilitet til systemet eller leverance af lagerkapacitet.

”**Markeder/Business cases/Regulering**” beskriver nye nødvendige markeder og incitament strukturer, som skal sikre økonomisk optimalitet. Politikker og



Figur 8. De fem lag i Smarte Energisystemer

reguleringer (rammebetingelser) skal ændres, så det styrker og understøtter udviklingen af det fremtidige fleksible energisystem.

”Kontrol og digitalisering” dækker over det behov, der vil være for at udvikle kontrol og styring baseret på information og kommunikation på tværs af sektorer. Der skal bruges intelligente værktøjer som fx

simuleringer og kunstig intelligens (AI) for at koordinere produktion, transmission og distribution som support til en optimering af systemet og for at skabe et effektivt marked og optimal drift og investering af infrastruktur (net).

”Data og Kommunikation/styring” indeholder, at driften af det fremtidige energisystem bliver baseret

Case	Potentiel PJ reduktion	Potentiel mio. tons CO2 reduktion	Potentiel reduktion relativt ift. 2030 basisfremskrivning (%)	Tidshorisont for effekt	Forskningsbehov
Case A - Fuldt elektrificeret vejtransport	120	11.2	93%	0-15 år	Ladeteknologi, brugeradfærd, netbelastning, analytics, intelligent ladeinfrastruktur, flådetyringsværktøjer, smartgrid kommunikation. fleksibilitetsydelse til netselskaber, service-baserede forretningsmodeller.
Case B - Sektorkobling mellem el og fjernvarme	21	2.5	89%	0-10 år	Behov og potentiale for fleksibilitet, dataplatforme, styre- og kontrolsystemer, fleksibilitetsmarked og produkter, analyse af krav til regulering og af værdien af fleksibilitet.
Case C - Bygningsmasse	25	1.8	92%	0-25 år	Karakterisering af bygningers fleksibilitet, regulering mhp. at fremme fleksibilitet, styring af varme- og kølesystemer, materialer med bedre termiske egenskaber, opvarmningsløsninger som øger fleksibiliteten, personaliseret indeklima, energimærkningsordning metoder til energiforbedringsindsatser, principper for design af bygninger og byer mhp. grøn omstilling.
Case D - Elektrificering og integration af industriens processer	20	3	73%	0-25 år	Potentiale for elektrificering, tekniske løsninger til alle temperaturniveauer, kapaciteter, effektive varmepumpeanlæg til alle temperaturer, varmepumper som anvender naturlige og andre ikke-miljøskadelige kølemidler, hybridløsninger, digitalisering, forsynings-sikkerhed og kapacitet i elsystemet, løsninger som både giver høj fleksibilitet, produktivitet og produkt-kvalitet, industrisektoren i energisystemanalyser.
Case E - Sektorkobling mellem el og gas	-54	3.5	64%	10-25 år	Udvikling af økonomisk attraktiv elektrolyseteknologi, termisk forgasning/pyrolyse, biologiske anlæg/fermentering, gasser der er de mest fordelagtige energibærere, værdien af fleksibilitet, tekno-økonomisk benchmarking af forskellige system layouts og teknologivalg, regulerbarhed for de enkelte konverteringsteknologier, fleksibilitet ved at sammenkoble power2gas med andre lagringsteknologier.
Case F - Vanddistribution og -behandling	(fleksibilitets-effekt)	(fleksibilitets-effekt)	(fleksibilitetseffekt)	0-25 år	Drikkevand: Pumpning til vandtårn, muligheder ift. afsaltning af havvand. Spildevand: Forskellige typer rensningsanlægs fleksibilitet, potentiale for smart styring af pumpestationer, spildevandsafgift/elafgift i forhold til bæredygtig styring af spildevandssystemer.
I alt - Alle 6 cases	142	22	83% for cases, (58% i alt)	-	

Figur 9. CO2-reduktion potentialet i 6 Smarte Energisystem cases, tidshorisont for effekt samt forskningsbehov.⁵³ Beregningerne er baseret på Energistyrelsens basisfremskrivninger, og der er tale om et overslag.

⁵³ Bemærk at biomasse er regnet CO2-neutral, som antaget i UN-konventionen. I realiteten er biomasse dog ikke altid CO2-neutral.

på et betydeligt større antal signaler og andre data. Der vil være et stort antal af aktive enheder, der skal styres, og der vil blive udnyttet mange og forskellige kilder til drift af infrastruktur og til optimering af drift. Cybersikkerhed er et væsentligt element at forholde sig til.

”Fysiske system (komponenter og infrastruktur)”

indeholder alt det fysiske, der indgår i det samlede system. Fra kobling af energisektorer via konverteringskomponenter. Der sker integration af forbrug på transport, bygninger, industrielle processer (inkl. i landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution. El fra vedvarende energikilder bliver konverteret til energi-tjenester i alle sektorer. Alle sektorer bidrager samtidigt til lagerkapacitet og balancerende af systemet.

6 cases der kan skabe CO2-reduktion

I det følgende gennemgås 6 cases som eksempler på vigtige (men ikke eksklusive) elementer i det Smarte Energisystem (se Figur 9). Beskrivelsen tager udgangspunkt i de fem niveauer og begynder med det fysiske system. Til sidst i hver case beskrives forskningsbehovet bredt inden for eksempelområdet. Casene har relativt kort tidshorisont, hvilket vil sige, at de kan implementeres 2020-2025, hvis dette besluttet.

De seks cases er: Elbilsintegration, Sektorkobling mellem el og fjernvarme. Bygninger. Elektrificering og integration af industrielle processer i industri (inkl. i landbrug og datacentre). Sektorkobling mellem el og gas, med udvikling af brintteknologier, Power-to-X og produktion af både flydende og gasformige brændstoffer. Distribution og behandling af vand.

Sektorkobling og Smarte Energisystemer kan facilitere et potentiale for CO2-reduktioner. Ifølge de beregninger, som er udført i projektet, vil man inden for de seks cases i Figur 9, der alle tegner sig for betydelige andele af energiforbruget, kunne opnå besparelser

på 80-95 % i udslippene af CO2. Det totale potentiale inden for de seks cases estimeres til 22 millioner tons CO2. Til sammenligning mangler vi at reducere udledningen med 29,4 millioner tons ift. den udledning af CO2, der var i 2017, hvis vi skal nå målet om en 70 % reduktion i 2030. Med andre ord er det bestemt ikke kun marginale CO2-reduktioner, der står på spil.

I denne forbindelse er det vigtigt at bemærke, at langt de fleste Smarte Energisystem tiltag har en meget betydelig interaktion med energisystemet og markeder. Derfor kan deres effekt på reduktion af CO2-udledning kun opgøres ved, at alle tiltagene, der gennemføres, analyseres samlet i en energisystemramme/model. Når fremtidige effekter af enkelte tiltag, herunder deres rentabilitet, belyses, kan det have afgørende betydning, hvorledes det samlede energisystem er sammensat, og hvor meget fleksibilitet andre teknologier allerede bidrager med.

Der er endvidere meget stor indbyrdes interaktion og konkurrence mellem en række af tiltagene, der bidrager med fleksibilitet, og for hvilke rentabiliteten afhænger af hyppigt forekommende svingninger i markedspriser og perioder med lave priser. Det er derfor ikke åbenlyst, at alle elementer på en gang kan opnå tilstrækkelig volumen til at være rentable.

I nedenstående tabel (se Figur 10) er der et overblik over de 6 cases, deres modenhed på forskellige parametre og deres bidrag til fleksibilitet. Analyser gennemført i sektorudviklingsprojektet viser, at modenheden med hensyn til at realisere potentialerne er varierende, og at casene har en implementeringstid på mellem 0-10 og 0-25 år. Vi skal derfor i gang nu og her med disse omstillinger, hvis vi skal opnå væsentlige reduktioner i CO2-udledninger til 2030. Samtidig er det en forudsætning, at man parallelt satser på Smarte Energisystemer og på de nødvendige tekniske og strukturelle forandringer i en række sektorer i samfundet.

	Cases	Modenhed af infrastruktur	Teknologisk modenhed	"Readiness" to Smart Energy System	Begrænset af regulering	Modenhed af marked	Fleksibilitet		
							Sekund	Time og dag	Sæson
	Def:	Udbredelse og funktion af nødvendig infrastruktur for at realisere casen	Modenhed af teknologien ift. markedet hvis casen skal implementeres	Er casen klar til at indgå i et Smart Energisystem, eller udestår der forskning, innovation og test og demonstration?	Hvorvidt den pågældende case overhovedet kan lade sig gøre i eksisterende rammebetingelser	Er der et "pull" i markedet, så den pågældende case bliver "drevet" frem.	Skaber balance i elnettet, sikrer spændingskvaliteten og forsynings-sikkerheden	Skaber fleksibilitets-mulighed på daglige udsving af vedvarende energi-produktion	Kan opbevare energi (evt. på anden form) og levere den på længere tidsskalaer
A	Fuldt elektrificeret vejtransport	▼	▲	▼	▼	▼	▲ ▲ Op. og afladning kan styres på kort tidsskala	▲	▼ ▼
B	Sektorkobling mellem el og fjernvarme	▲	▲ ▲	▬	▼	▲	▲	▲ ▲	▲
C	Bygnings-masse	▲	▲ ▲	▬	▼	▼	▬	▲ Simpel styring gør det muligt at slukke i flere timer i streg	▬
D	Elektrificering og integration af industriens processer	▲	▼	▬	▲	▬	▬	▲	▼ ▼
E	Sektorkobling mellem el og gas	▲	▼	▬	▲	▼	▼	▲ ▲	▲ ▲
F	Vand-distribution og -behandling	▲ ▲	▬	▼	▬	▼		▲ ▲	▼ ▼

+2: ▲ ▲ = Stor modenhed +1: ▲ = Lille modenhed 0: ▬ = Neutral grad af modenhed -1: ▼ = Lille umodenhed -2: ▼ ▼ = Stor umodenhed

Figur 10. Grad af modenhed af de 6 Smarte Energisystem cases og deres bidrag til fleksibilitet.



Case A: Fuldt elektrificeret vejtransport

Elektrificeringen af vejtransporten er et vigtigt middel til at nå Danmarks reduktionsmål for CO₂. Som del af denne udvikling vil der være et stort forsknings- og udviklingspotentiale i at klargøre elsektoren og elnettet til denne elektrificering. Netintegrationen af elektriske køretøjer vil kræve at ladeinfrastruktur og nettets kapacitet er tilstrækkelig til at møde det nye forbrug – samtidig med at forbrugsfleksibilitet i opladningen af elektriske køretøjer kan nyttiggøres til at understøtte elnettet og øge anvendelsen af vedvarende energi.

Det fysiske system

Elektriske køretøjer vil kunne understøtte produktionen af vedvarende energi ved at maksimere dets anvendelse via fleksibelt forbrug og ved at bidrage til effekt og energibalancen i elnettet. Dette kræver en kobling mellem transport og energisektoren.

En af nøgleudfordringerne i denne integration er den ladeinfrastruktur, som forbinder og udgør grænsefladen mellem elektriske køretøjer og elnet. Herudover vil en omlægning af en større andel af transportsektoren til el kræve, at elnettet opfylder nye krav.

Data og kommunikation

Der er behov for udvikling af åbne standarder og kommunikationsprotokoller på internationalt niveau. Der skal udvikles åbne dataplatforme, hvor data kan bruges intelligent ind mod det fremtidige energisystem.

Kontrol og digitalisering /Regulering

Ud over udvikling af ladeinfrastruktur og elektriske køretøjer er der behov for udvikling af (smarte) metoder, intelligente komponenter og software-systemer. Elektriske køretøjer og ladeinfrastrukturen kan fx bruges til frekvensregulering. Det kræver implementering af smart styring og krav til ladestandarder og de elektriske køretøjers egenskaber. Muligheder som batteri til batteri elektriske køretøjer imellem og opladning fra et stationært batteri ifm. hurtigladestationer er også nye muligheder. Det er vigtigt, at det i de styringsenheder og standarder, der udvikles, sikres, at elektriske køretøjer kan indgå i en portefølje af forskelligartede ressourcer. Når en intelligent infrastruktur og elektriske køretøjer er på plads, kan denne nyttiggøres i en række digitale energiløsninger.

Markeder/Business Cases/Regulering

Fleksibilitetsmarkedet er ikke eksisterende i dag. Der skal udvikles nye markedsprodukter og tariffer, herunder betalingskontekst, abonnement, flatrate, payper-energy, RFID, etc. Fleksibilitetsydelser via nye markedsmodeller bør afprøves i fx nationale testzoner. Endvidere skal der arbejdes med tekniske krav og regulativer for elektriske køretøjer og ladeinfrastruktur.

Service (Forsyningsselskaber og/eller Prosumers)

Udover at ændre transport baseret på fossile brændsler til transport baseret på vedvarende energi, så vil

Elektriske køretøjer kan levere forbrugsfleksibilitet og energilagring på flere niveauer i elnettet - fra en enkelt bygning til det samlede elnet.



servicen via elektriske køretøjer også være målrettet en fleksibilitetsydelse til forsyningsselskaber.

Øvrigt

Andre transportbehov kan også elektrificeres, såsom fly og færger.

Forskningsbehov

- Analyse af kørsels- og parkeringsadfærd (og ladeadfærd med øget batteristørrelse) blandt andet for at undersøge samtidighed for opladning
- Analyse af behov for ladeinfrastruktur og elektriske køretøjers egenskaber

- Definition og test af intelligent ladeudstyr. Dette inkluderer arbejde indenfor standardisering og smartgrid kommunikation
- Test af netydelser fra elektriske køretøjer, deriblandt nye fleksibilitetsydelser til netselskaber
- Udvikling af nye ladeteknologier (autonom tilslutning, trådløs, super fastcharging)
- Udvikling af krav til ladestanderes egenskaber
- Implementering af smart styring
- Udvikling af batteri til batteri, o.a.



Case B: Sektorkobling mellem el og fjernvarme

Det fysiske system

Fjernvarme udgør en væsentlig bestanddel af energisystemet i det nord-, central- og øst-europæiske område, hvor det tempererede klima medfører et betydeligt behov for opvarmning. Endvidere er der i Europa et stort behov for køling, som i stigende omfang leveres som fjernkøling. Fjernkøling anvendes dog endnu kun i begrænset omfang i Danmark. Samlet set udgør forbruget til varme i Danmark knap 40 % af det samlede energiforbrug. Af dette står fjernvarmen for ca. 50 %, og heri er inkluderet opvarmning til boliger, service og industri. Omstillingen til vedvarende energi i fjernvarmesektoren har været hurtig og markant og udgør i dag ca. 60 % af det samlede brændselsforbrug i sektoren. En stor del af dette udgøres dog af biomasse, som ikke altid kan regnes for CO₂-neutral. Olie er stort set faset ud, og kul-andelen er kraftigt faldende.

Fjernvarme-sektoren kan ved at installere store varmepumper være med til at mobilisere fleksibilitet i elsystemet (sektorkobling mellem el og varme). Når der pga. meget vind i energisystemet er overskud af vind-genereret elektricitet, så kan varmepumperne startes op og forbruge den overskydende el. Tilsvarende kan de lukkes ned, når der kun er lidt vindproduceret strøm. Fjernvarmen fungerer således som et vandlager for overskydende el i energisystemet. Det er et lager med en betydelig kapacitet. Dette vil skabe større værdi af den vind-producerede strøm samt være med til både at stabilisere priserne på elmarkedet og sikre balance i elsystemet.

Data og kommunikation

De i dag eksisterende data på fjernvarmeværker og fra elmarkedet vil i vid udstrækning være tilstrækkelige til at etablere denne form for sektorkobling på det enkelte fjernvarmeværk. Etablering af et egentligt fleksibilitetsmarked, hvor flere fleksibilitetselementer som eksempelvis varmepumper kan byde ind, vil kræve udvikling af data-platforme og kommunikationsudstyr.

Kontrol og digitalisering

Driften af varmepumperne kan eksempelvis styres af priserne på elmarkedet. Til driften på det enkelte fjernvarmeværk eksisterer der i dag kontrolalgoritmer, som kan håndtere dette, og som også kan tage hensyn til en optimering over tid. Hvis store fjernvarme-varmepumper skal indgå i et større fleksibili-

tetsmarked, vil det kræve en øget forskningsindsats i form af udvikling af styre- og kontrolsystemer, baseret på digitale løsninger.

Regulering

Den væsentligste barriere i dag af reguleringsmæssig karakter er afgiften på el til varme. Denne er blevet sænket i det seneste Energiforlig. Men spørgsmålet er, om det giver økonomisk incitament nok for fjernvarmeværker til at foretage investeringer i store varmepumper, som til en vis grad er risikoprægede.

Markeder

Sektorkobling baseret på store varmepumper i fjernvarmesystemet vil i dag primært mobilisere fleksibilitet, såfremt der er en business case for det enkelte fjernvarmeværk i at køre varmepumpen, når elprisen er lav og stoppe den ved høje elpriser. Et bredere funderet fleksibilitetsmarked er ikke eksisterende i



5 MW varmepumpe, der leverer varme til København baseret på havvand og spildevand (Kilde: HOFOR)

dag, men vil åbenlyst kunne udvide mulighederne for rentabel drift. Dette vil kræve udvikling af nye markedsprodukter for fleksibilitet.

Service (Forsyningsselskaber og/eller Prosumers).

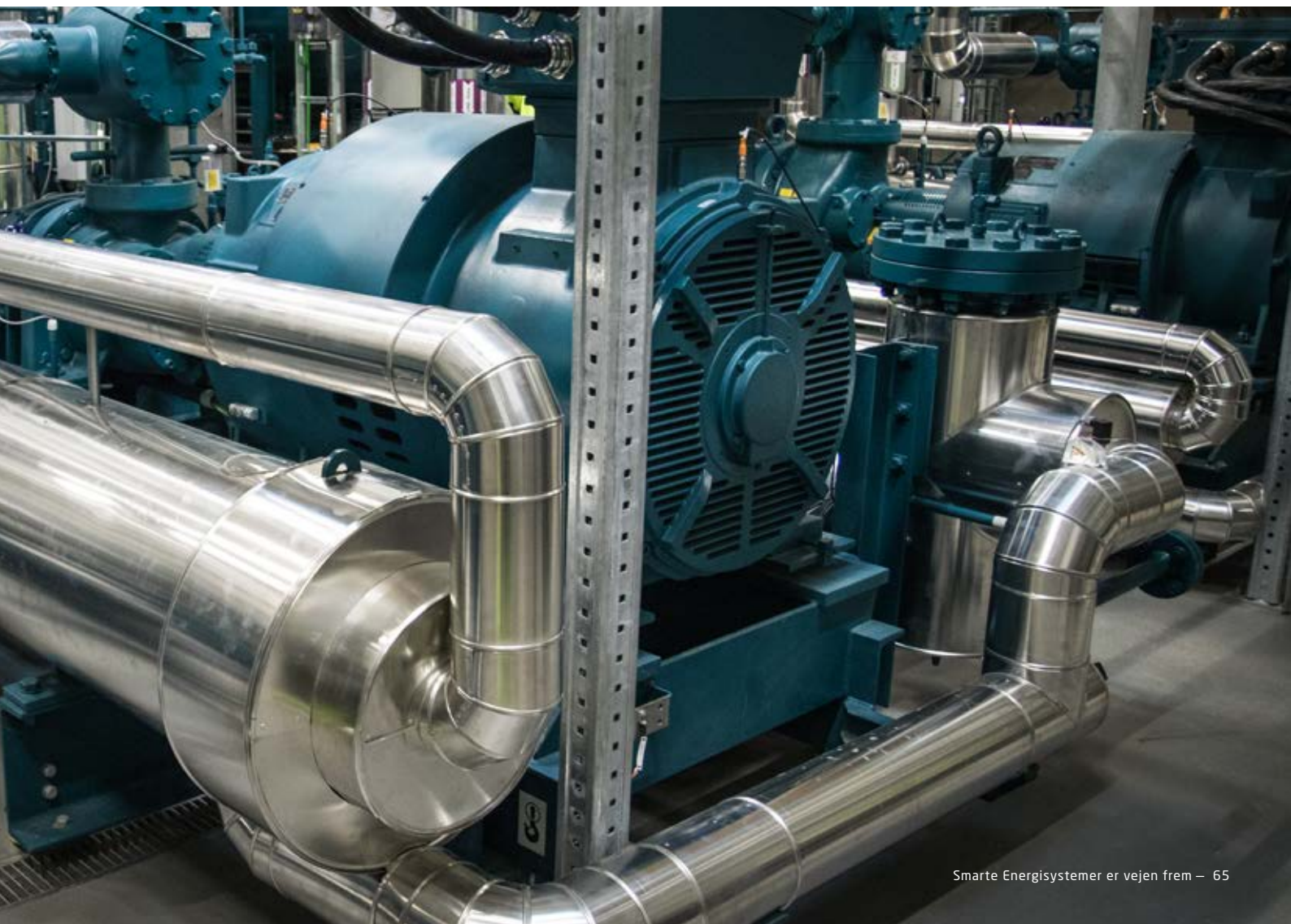
Udover at give fjernvarmeværkerne en konkret business-mulighed, så vil servicen være målrettet en fleksibilitetsydelse til forsyningsselskaber. Hvis fleksibilitet i større omfang skal mobiliseres vha. sektorkobling, vil det kræve, at forsyningsselskaber og TSO værdisætter denne fleksibilitets-service, evt. gennem at etablere et fleksibilitetsmarked.

Forskningsbehov

- Analyse af behov og potentiale for fleksibilitet gennem sektorkobling
- Udvikling af dataplatforme og kommunikationsudstyr

- Optimering af styre- og kontrolsystemer på enkeltværker
- Udvikling af styre- og kontrolsystemer til integration af multiple fleksibilitetselementer i en system-sammenhæng
- Analyse af krav til et fleksibilitetsmarked
- Nye markedsprodukter for fleksibilitet (i forbindelse med et fleksibilitetsmarked)
- Analyse af krav til regulering
- Analyse af værdien af fleksibilitet
- Optimering af anlægsdesign og -integration for høj effektivitet og fleksibilitet

Som indikeret overfor stilles de største krav til forskning ved etablering af et egentligt fleksibilitetsmarked, hvor flere fleksibilitetsefterspørgere og -producenter kan byde ind.



Case C: Bygningsmasse

Det fysiske system

Bygningsmassen har potentiale for udgøre et lager for termisk energi gennem regulering af bygningernes varmesystemer (og kølesystemer). Det vil give sig udslag i ændringer i temperaturen i bygningerne, og potentialet vil derfor afhænge af, hvor store temperaturændringer der kan accepteres mht. komfort og af, hvor hurtigt temperaturen i bygningerne ændrer sig efter en ændring i varmetilførslen. I nye velisolerede bygninger kan varmetilførslen afbrydes i længere tid end ældre bygninger med stort varmetab. Det giver potentiale for at udnytte lagerkapaciteten på forskellige tidsskalaer.

Data og kommunikation

For langt de fleste bygningers vedkommende er det i dag ikke muligt at regulere bygningens varmesystem med et eksternt signal fx fra forsyningsselskabet, og mange bygninger har ikke nogen regulering af varmesystemet ud over selvvirkende radiatortermostater. Der er derfor behov for at udvikle standarder for kommunikation mellem varmesystemet og energiforsyningen, og der er også behov for at udvikle og udbrede intelligente komponenter i den eksisterende bygningsmasse.

Kontrol og digitalisering /Regulering

Der er behov for at udvikle metoder for intelligent styring til implementering i bygningerne. Mange eksisterende teknologier kan implementeres såsom

varmeforsyningsanlæg med reguleringsmuligheder, fjernstyrende termostater i de enkelte rum og fjernaf-læste varmemålere.

Det er en stor udfordring, at langt de fleste bygninger allerede er bygget, og det vil kræve en stor indsats at opgradere disse eksisterende bygninger med ny teknologi.

Markeder/Business Cases/Regulering

Fleksibilitetsmarkedet er ikke eksisterende i dag. Der skal udvikles nye modeller for afregning mellem forsyningsselskaber og bygningsejere. Energifriser baseret på adgang til bygningens fleksibilitet osv.

LCA af Smarte Energisystemer

Beregninger foretaget på nyere byggeri viser, at over bygningers samlede levetid er det indlejrede energiforbrug og miljøpåvirkninger større end bidragene fra driftsenergiforbruget. Der er behov for en dybere forståelse af denne fordeling, og af hvorledes en næste generation af LCA algoritmer kan tjene til at tilvejebringe et mere bæredygtigt byggeri. Også i forhold til andre dele af fremtidens Smarte Energisystem bør der udarbejdes operationelle metoder til indregning af de indlejrede miljøpåvirkninger. Desuden er der brug for metoder, som kan kvantificere den store usikkerhed, som ofte er knyttet til LCA opgivelser.

Boks 10. Behov for LCA af Smarte Energisystemer bl.a. inden for bygningsmasse.



Aktivering af bygningsmassens potentiale kræver smart regulering af bygningernes varmesystemer

Service (Forsyningsselskaber og/eller Prosumers)

Bygningsmassen vil kunne levere fleksibilitet som en service til forsyningsselskaber.

Forskningsbehov

- Udvikling af metoder til karakterisering af bygningers fleksibilitet
- Udvikling af mekanismer i bygningsreglementet som kan regulere bygningers fleksibilitet
- Udvikling af nye teknologier for kommunikation og intelligent styring af bygningers varme- og kølesystemer
- Udvikling af nye materialer med bedre termiske egenskaber fx faseskiftmaterialer
- Udvikling af opvarmningsløsninger som øger fleksibiliteten
- Udvikling af løsninger som kan lette brugernes muligheder for at få et godt og personaliseret indeklima. Eksempelvis gennem ny apps der kobler sensor data sammen med personlige evalueringer
- Udvikling af metoder til en digital og evidensbaseret energimærkningsordning
- Udvikling af metoder til at effektivisere og optimere energiforbedringsindsatser
- Udvikling af principper for design af bygninger og byer således, at de kan indgå i en effektiv omstilling til fossil-frit samfund



Case D: Elektrificering og integration af industriens processer

Det fysiske system

Industriens energianvendelse udgør en væsentlig del af energisystemet, både i Danmark og internationalt. En stor del af energien anvendes i termiske processer til opvarmning og køling. Kølingen kan anses for at være typeeksemplet på tidlig sektorkobling, idet det i første halvdel af det tyvende århundrede blev sædvanligt at anvende kompressionskøleanlæg drevet af el fra nettet. Inden da var både kompressorer drevet af dampmaskiner og andre motorer samt varmedrevet køling udbredt.

Industriens varmebehov til procesvarme kan elektrificeres ved udnyttelse af varmepumper og direkte elvarme, samt andre teknologier som fx mikrobølger eller induktion. Dette vil gøre det muligt at integrere vedvarende energi i langt højere grad. Den mest effektive udnyttelse af integrationspotentialet sker ved anvendelse af varmepumper som udnytter el til at løfte en energistrøm fra lavere til højere temperaturniveau med høj effektfaktor (COP). Effektfaktoren hænger sammen med det temperaturløft som kræves, og derfor er det optimalt at finde lavtemperaturkilder ved højst mulig temperatur, fx overskudsvarme fra industriens processer. Varmepumper i industrien giver dermed mulighed for høj effektivitet i sektorkoblingen til udnyttelse af den vedvarende energi.

Industrien vil tillige kunne understøtte produktionen af vedvarende energi ved at maksimere dets anvendelse via fleksibelt forbrug og ved at bidrage til effekt og energibalancen i elnettet.

Nogle af de væsentlige udfordringer er, at varmepumper til høje temperaturer og nogle af de andre teknologier kræver væsentlig udvikling for at kunne nå de nødvendige temperaturer. Desuden vil elinfrastruktur være nødvendig at udvikle for at kunne levere de store effekter, som industrien nu får leveret i form af naturgas.

Yderligere potentiale for integration kan opnås ved sektorkobling mellem overskudsvarme fra industrien og fjernvarme og mellem overskudsvarme fra køleprocesser og til procesvarme. Køleprocesserne afgiver den optagne varme samt el som overskudsvarme, hvilket kan udnyttes som varmekilder enten direkte eller ved brug af varmepumper.

Data og kommunikation

I industrielle processer opsamles en del procesdata. Disse er primært fokuseret på produktivitet og produktkvalitet og i mindre grad på energioptimering. Der vil ofte være behov for at opsamle yderligere data og at kvalitetssikre disse for at udnytte integrationspotentialet.

Kontrol og digitalisering /Regulering

Digitalisering vil kræve yderligere investering i sensorer, dataopsamling og sikring af datakvalitet og -tilgængelighed. Der er behov for udvikling af (smarte) metoder, intelligente komponenter og softwaresystemer for dette.

Allerede eksisterende elforbrug og yderligere elektrificerede processer kan medvirke til, at industriens processer kan indgå som frekvensregulering og andre typer af støtte af elsystemet. Det vil dog kræve, at der er incitamenter til at indgå i dette.

Når en intelligent infrastruktur er på plads, kan denne nyttiggøres i en række digitale energiløsninger.

Markeder/Business Cases/Regulering

Energi er primært en forsyning for industrien, og derfor er langt det vigtigste forsynings sikkerhed. Men industrianlæg er ofte store enkeltstående energibrugere, og de kan derfor bidrage væsentligt både til sektorkobling og at mobilisere fleksibilitet. For nuværende er det dog næsten udelukkende økonomiske betragtninger, som vil anspore til elektrificering. Store investeringer i selv effektive varmepumper ligger derfor ikke lige for, da tilbagebetalingstiden ofte bliver længere end det sædvanligt accepterede.

Der kan opnås yderligere potentiale ved installation af energilagere, både batterier og termiske lagre til varme og køl.

Service (Forsyningsselskaber og/eller Prosumers).

Udover at ændre varmeforsyning baseret på fossile brændsler til forsyning baseret på VE-teknologi, så kan elektrificering og eksisterende elforbrug også være målrettet en fleksibilitetsydelse til forsyningsselskaber.

Øvrigt

Integration mellem varme, køl, og elforbrug giver væsentlige muligheder for fleksibilitet i industrien.

Forskningsbehov

- Kortlægning af potentiale for elektrificering
- Kortlægning af tekniske løsninger til alle temperaturniveauer og kapaciteter
- Udvikling af effektive varmepumpeanlæg til alle temperaturer, også høje temperaturer over 100 °C
- Udvikling af varmepumper som anvender naturlige og andre ikke-miljøskadelige kølemidler
- Udvikling af hybridløsninger mellem varmepumper og andre elbaserede varmeteknologier, fx til høj temperatur eller spidskapacitet
- Udvikling af digitaliseringsløsninger med høj værdi for både industri og energisystem
- Analyse af forsyningssikkerhed og kapacitet i elsystemet
- Udvikling af løsninger som både giver høj fleksibilitet, produktivitet og produktkvalitet
- Introduktion af industrisektoren i energisystem-analyser



Teknologisk udstyr i et moderne mejeri

Case E: Sektorkobling mellem el og gas

Det fysiske system

Danmark har ligesom store dele af Europa et vidt forgrenet gasnet, der tillader lagring og transport af store energimængder på tværs af landet og i store dele af landet helt ud til de enkelt husstande. Således er ca. 22% (2015) af landets boliger opvarmet ved hjælp af gas, og 27 % af primær "energiproduktionen" i Danmark stammer fra naturgas. Gasnettet udgør i dag en vigtig del af den danske energi-infrastruktur og repræsenterer en betydelig værdi, som bør indtænkes og udnyttes i overgangen til et bæredygtigt energisystem. Udledningsreduktionskravene vil betyde, at brugen af gasnettet frem mod 2050 vil skifte fra anvendelsen i dag både med hensyn til oprindelsen og arten af gassen, der transporteres samt de ydelser der leveres. I dag distribueres i hovedsagen naturgas, der bruges i boligopvarmning, i industrien samt til el-produktion. Fremtidigt vil nettet kunne anvendes til lagring og transport af gas udvundet på basis af fornybare ressourcer (biogas, forgasningsgas, brint og metan produceret ved elektrolyse) og et skift i de services, der leveres, må forventes. Fremtidige anvendelser af gasnettet og services baseret på dette kunne således omfatte:

1. Distribution af bæredygtige gasser. Grøn gas produceres som biogas, termisk forgasning eller evt. som brint via elektrolyse. Biogasproduktionen er stærkt stigende (ca 28 PJ i 2025), og der er stadig et betydeligt udbygningspotentiale. Desuden er der et betydeligt i dag uudnyttet potentiale i biomasser, der vha. termisk forgasning eller pyrolyse kan omsættes til gas. Alene halm udgør i Danmark et potentiale på ca. 65 PJ. Endelig kan store gasmængder produceres vha. spaltning af vand ved elektrolyse (brint). Herved etableres en kobling mellem el-sektor og gas-sektor ("Power-to-Gas"), hvilket vil give fleksibilitet i retning af at matche forbrug og produktion, samt mulighed for lagring af energi som brint, j.f. beskrivelsen nedenfor.

2. Distribution af gasser til transportsektoren.

En stor del af transportsektoren forventes elektrificeret, men specielt den tunge transport er vanskelig at elektrificere. Dette drejer sig primært om fly-transport, langdistance maritim transport og tung godstransport. I et bæredygtigt energisystem kan disse ydelser leveres vha. bæredygtige "syntetiske" brændstoffer, der formentlig mest

økonomisk kan produceres ud fra biomasse og vha. elektrolyse. Gasnettet vil kunne anvendes i forbindelse med distribution af brint eller metan, der kan anvendes direkte som brændstoffer eller i transmission af metan til centrale brændstoffabrikker, der producerer flydende brændstoffer ud fra metan. En sådan brændstofproduktion, der involverer elektrolyse, etablerer en kobling mellem el-systemet og gas-nettet ("power2gas") i retning af at levere ydelser til transportsektoren

3. Boligopvarmning. Betydelig fleksibilitet i energisystemet kan opnås gennem såkaldte hybrid-systemer, hvor en el-varmepumpe kombineres med en (eksisterende) gaskedel, hvor gas bruges på de tidspunkter, hvor el er dyr, eller der er kapacitetsflaskehalse i el-distributionsnettet.

Power2Gas. Elektricitet produceret ud fra vind- eller sol-energi kan i elektrolyseanlæg udnyttes til at spalte vand til brint og ilt. Brinten kan lagres og siden anvendes som brændstof evt. efter en opgradering. Herved etableres en vigtig kobling mellem el- og gas-sektoren.



4. Energilagring (stor skala). De to eksisterende gaslagre i Danmark udgør et betydeligt lagrings-potentiale svarende til ca. 2 måneder af Danmarks samlede energiforbrug. Sammen med produktionen af grønne gasser, herunder brint, giver dette en unik fleksibilitet i det danske energisystem.

Data og kommunikation

Både via de ovenfor skitserede "Power-to-Gas" løsninger og i de skitserede parallelforsyninger (hvor kunder kan trække på både gas- og elnettet) skabes koblinger mellem el- og gas-systemerne. Store dele af belastningen på et-systemet vil kunne forskydes i tid, og der kan trækkes på lagre, når dette er krævet af hensyn til stabilitet af el-nettet, eller det er økonomisk fordelagtigt for anlægsejer. Økonomisk optimal drift, sikring af stabiliteten og balance på el-nettet,

og forvaltning af lagerressourcer på gasnettet kræver planlægning af drift baseret på pålidelige prognoser og data for el-produktion (fra vind og sol) såvel som kendskab til variation i forbrugsdata. Systemerne og udbydere må kunne trække på, og forstå at udnytte, sådanne data - de nødvendige platforme og det fornødne kommunikationsudstyr må etableres. Power2gas løsninger vil kunne byde ind på et "fleksibilitetsmarked".

Kontrol og digitalisering

Driften af "Power-to-Gas"-anlæg bør primært styres via el-prisen. I mindre grad kan varmepriser spille ind samt incitamenter, der sikrer opbygning af den nødvendige lagerkapacitet. Dominerende på udgiftssiden i anlægsøkonomi er anlægsinvestering og el-pris, og på indtægtssiden salg af gas til services eller lager



og salg af varme, hvorfor anlæggene bør kontrolleres under hensyntagen til såvel øjeblikkelig el-pris som pris- og værdi-prognoser. Styre- og kontrolsystemer og data-indsamling/håndtering, der tillader dette, må udvikles/implementeres.

Regulering

I dag premieres grøn gas produktion (biogas) med en særlig afregningstarif. Denne, eller tilsvarende incitament-struktur, bør udstrækkes til også at gælde gasser fremstillet ved elektrolyse og vha. termisk forgasning. Herved vil investering i teknologi, der fremmer den ønskede sektorkobling, muliggøre stor-skala energilagring samt reducere udledninger fra boligopvarmning samt fremme omstillingen af transportsektoren. Investeringer i anlæg af denne type er i høj grad risikopræget, idet værdien af de opnåelige udledningsreduktioner ikke slår igennem for anlægsejer uden regulering via krav/afgifter/incitamenter.

En udfordring i denne forbindelse er, at afgifter på el (transmissionsafgift, afgift til stat osv.) dæmper fluktuationerne, hvorfor det økonomiske incitament til at etablere teknologier, der kan udvise fleksibilitet mht. forbrug/produktion dæmpes.

Markeder

Den beskrevne kobling mellem el-sektor og gasnet giver muligheder for leverance af flere forskellige ydelser; 1) energitransmission, 2) leverancer af e-fuels til transportsektor, 3) ydelser til boligopvarmning, 4) lagerydelse og tilbagekonvertering til el, og teknologien (-erne) kobler således til flere eksisterende og mulige fremtidige markeder. Forbruget kan i betydelig grad tidsforskydes, idet produktet lader sig lagre, hvorfor teknologien (-erne) vil give betydelig fleksibilitet til energisystemet og systemejere vil kunne byde ind på et eventuelt fleksibilitetsmarked.

Services (Forsyningsselskaber).

De services power2gas og Biomass2gas teknologier koblet op på gasnettet vil kunne levere er diskuteret i de foregående afsnit. Gasselskaber, TSO'er og Energiselskaber er blandt de aktører, der vil kunne udbyde services baseret på de beskrevne koblingsteknologier. De præcise forretningsmuligheder afhænger i høj grad af den nationale såvel som den europæiske klimapolitik. Hvorledes udvikler kvoteprisen sig i ETS (EU's Emissions Trading System)? og hvilke afgifter/incitamentsstrukturer vil blive etableret for at sikre reduktion af udledninger fra energi- og transportsek-

toren samt evt. tilskyndelseeffekter for forøget anvendelsen af biomasse til at fortrænge naturgas.

Forskningsbehov

For denne case gælder, at der er et betydelig forsknings- og udviklingsbehov omkring de indgående konverteringsteknologier. Herunder:

Elektrolyse, Power-to-Gas

- Udvikling af økonomisk attraktiv elektrolyseteknologi. For de tre hovedteknologier gælder mere specifikt:
 - o Alkalisk elektrolyse skal forbedres mht. pris og energieffektivitet
 - o PEM elektrolyse skal forbedres mht. anvendelsen af Iridium – her skal findes alternativer, eller den anvendte mængde skal reduceres kraftigt
 - o SOEC, her er den største udfordring at skalere teknologien op til multi-MW-skala (både mht. produktionsapparatet og modulstørrelser) og at forbedre levetiden

Biomass2gas, Biomass2fuel

- Termisk forgasning/pyrolyse. Her kræves yderligere procesudvikling, så anlægsøkonomien kan forbedres. Specifikt er der væsentlige F&U behov omkring forbedrede metoder til gas-rensning. For pyrolyse teknologien udestår der udfordringer omkring tryksat fødnings og reaktordesign
- Biologiske anlæg/fermentering. Her er behov for udvikling af "hybride" processer og procesanlæg, hvor også den producerede CO₂ (evt. efter tilslag af hydrogen) metaniseres, og der er behov for udvikling af konkurrencedygtige processer, der muliggør omsætning af ligning og hemicellulose

Analyser og sektorkobling

- Analyser af hvilke gasser der er de mest fordelagtige energibærere (brint, metan, CO/H₂-blandinger) og hvilke krav de stiller til gas-infrastrukturen, samt en analyse af optimal placering af anlæg (BM2gas, Power2gas, gas2liquid) er vigtig. Energistyrelsen har analyseret det overordnede behov, men ikke skala og placering
- Analyse af værdien af fleksibilitet
- Tekno-økonomisk benchmarking af forskellige system layouts og teknologivalg, der kan møde behovet i transportsektoren, såvel som systemets behov for storskala energilagring
- Analyse af regulerbarhed for de enkelte konverteringsteknologier.
- Analyse af fleksibilitet ved at sammenkoble Power-to-Gas med andre lagringsteknologier, eksempelvis varmelagring

Case F: Vanddistribution og -behandling

Det fysiske system

Det er velkendt, at pumper globalt set står for 10 % af elforbruget - og meget af dette forbrug er fleksibelt.⁵⁴

Rent drikkevand og håndtering af spildevand er essentielle opgaver for det moderne samfund. Til at sikre disse fornødenheder bliver der brugt væsentlige mængder energi til flere forskellige processer, herunder:

- Pumpning af drikkevand (fx fra grundvandsmagasin til vandtårn)
- Klargøring af drikkevand (fx afsaltning, blødgøring)
- Transport af spildevand (fx via pumpestationer fra forbrugere til rensningsanlæg)
- Rensning af spildevand (fx beluftning af spildevand i den biologiske behandling)
- Håndtering af "uønsket vand" (fx håndtering af ekstremregn via pumper)

Spildevandssystemer giver også en egenproduktion af biogas, som kan bruges til produktion af grøn el og varme til såvel eget forbrug som til at levere ind på diverse el-, gas- og termiske net.

Generelt er der fleksibilitet at hente ved at udnytte eksisterende konstruktioner for vandbehandling smart. I både drikkevandsforsyningen og spildevandshåndteringen er der mange steder bassiner til opmagasinering af vand, hvorfra smart styring af pumper kan give mening. Opholdstiden i den biologiske del af rensningsanlæg er typisk lang, og derfor kan beluftning tilpasses. Klargøring af drikkevand kan ligeledes gøres fleksibelt ved brug af bassiner/tanke til opmagasinering efter klargøringsprocesser. Smart styring af afløbssystemer og rensningsanlæg kan desuden bidrage betydeligt til bedre håndtering af ekstremregn og derved spare anlægsomkostninger og/eller skadesomkostninger. Samtidig kan de også føre til reduktion af driftsomkostninger pga. af bedre styring.

Pumper i afløbssystemer kan let levere en så hurtig respons, at de kan bidrage til stabilisering af frekven-

sen i elnettet. På rensningsanlægget er det beluftningen, som bruger mest strøm (ca. 70 % af strømforbruget på rensningsanlæg), og denne proces kan ikke stoppes men sættes ned eller op i hastighed. Hermed kan denne del levere ydelser til DSO net og til de balanceansvarlige.

Data og Kommunikation

Moderne anlæg til håndtering af spildevand og rent vand er i høj grad koblet på internettet, og det vil derfor - med passende aftaler og ikke mindst rammebetingelser - være relativt let at udnytte de store muligheder for fleksibilitet og grøn energiproduktion, som spildevandssystemer repræsenterer.

Håndtering af spildevand er et glimrende eksempel på et case, hvor de servicebaserede løsninger gennem et elforsyningsselskab ikke vil være løsningen for at tilvejebringe fleksibilitet. Første prioritet for et rensningsanlæg er at undgå vand i gaderne, og anden prioritet er at undgå at udlede snavset vand. Disse hensyn fordrer specialviden, som elforsyningsselskaber ikke råder over. Derfor viser erfaringer, at det først er når den smarte styring af spildevandsrensningen sker gennem envejskommunikation i form af prissignaler, at den smarte styring og mobilisering af fleksibilitet kommer til at virke.⁵⁵

Pumper i afløbssystemer kan let levere en så hurtig respons, at de kan bidrage til stabilisering af frekvensen i elnettet. På rensningsanlægget er det beluftningen, som bruger mest strøm (ca. 70 % af strømforbruget på rensningsanlæg) og denne proces kan ikke stoppes, men sættes ned eller op i hastighed. Hermed kan denne del levere ydelser til DSO net og til de balanceansvarlige.

Kontrol og digitalisering/Regulering

De traditionelle modeller til modellering af eksempelvis rensningsanlæg (ASM-modellerne) er ganske komplekse og ikke velegnede til at opfange information fra online sensorer. En succesfuld storskala implementering af løsninger til vandbehandling fordrer i høj grad, at der udvikles nye cyberfysiske eller grey-box modeller, som er optimeret til opsam-

⁵⁴<https://www.grundfos.com/water-energy/meet-the-water-and-energy-challenge-now/facts-about-pumps-and-sustainability.html>

⁵⁵Madsen, H., Parvizi, J., Halvgaard, R. F., Sokoler, L. E., Jørgensen, J. B., Hansen, L. H., & Hilger, K. B. (2015). Control of Electricity Loads in Future Electric Energy Systems. Handbook of Clean Energy Systems.

ling af værdier fra en lang række online sensorer og parallelt hermed til at kunne forudsige fx risiko for overløb mv. i næsten real tid.

Typisk er der yderligere behov for nye sensorer - eksempelvis optiske sensorer til målinger af sammensætningen af fx spildevand. Ligeledes er der behov for en udvikling af nye IoT platforme, som er koblet til den nye generation af grey-box modeller, og som dermed kan levere den optimale styring af de respektive anlæg til vandbehandling.

Markeder/Business cases/Regulering

Da de nuværende regler er udtænkt silo-orienteret (fx er el- og vandforsyningsloven ikke samtænkt), er der store reguleringsmæssige udfordringer for en kobling af vand- og energisystemer. En væsentlig udfordring skyldes de nuværende matrikel-regler og deres betydning for at udnytte egen energiproduktion eller fleksibilitet. Ydermere gælder det, at i mange tilfælde går grøn energiproduktion til spildevand, eller fleksibiliteten bliver ikke udnyttet. Konsekvensen af dette er, at en mulig og væsentlig reduktion af CO₂-udledning ikke udnyttes.

Indledende analyser af rensningsanlæg viser, at fleksibilitetsmulighederne kan lede til 3-4 % besparelser på Nordpool spot markedet samt ca. 12 % besparelser, når balancemarkedet regnes med. Med nye rammebetingelser og eksempelvis CO₂ koblede energiafgifter vil rensningsanlæg kunne reducere CO₂-udledningen ved elforbruget med 10 - 15 %.⁵⁶

De nuværende markeder for handel med el- og energi er imidlertid designet således, at det store fleksibilitetspotentiale dårligt kan udnyttes. Der er derfor behov for nye digitale og dynamiske markedskonstruktioner. Der vil givetvis være behov for specialviden og -aggregatorer, som er i stand til at sammenkoble viden i grænseområdet mellem vand og energi.

Reelt er der et stort potentiale for produktion af fx grøn gas. Tages dette i betragtning, vil besparelserne på CO₂ regnskabet blive langt større.

Internationalt er der flere grupper, som kigger på fleksibilitet inden for spildevandsrensning. Eksempelvis er der en gruppe hos NREL i Denver. I Singapore findes der i tilknytning til NTU en stærk gruppe ift. processer til spildevandsrensning.

Service (forsyningsselskaber og/eller prosumers)

Systemer til rensning af spildevand vil med fordel kunne bidrage til at løse BRP-relaterede problemer, mens eksempelvis pumper med fordel vil kunne levere både TSO- og DSO-relaterede ydelser (frekvensstabilisering, flaskehalsrelaterede services, samt spændingsregulering). Forudsætningen er dog, at der etableres en ny generation af pris- og kontrolbaserede løsninger koblet til nye digitale og dynamiske markeder.⁵⁷

Forskningsbehov

Generelt

- Karakterisering af fleksibilitetsfunktioner relateret til håndtering af vand
- Demonstrationsprojekt i stor skala som fokuserer på sektorkobling mellem vand og energi - og med fokus på barrierer i de nuværende rammebetingelser
- Udvikling af nye digitale og dynamiske el- og energimarkeder

Drikkevand

- Demonstrationsprojekt for pumpning til vandtårn
- Analyse af internationale muligheder ift. afsaltning af havvand

Spildevand

- Karakterisering af forskellige typer rensningsanlægs fleksibilitet
- Demonstrationsprojekt for rensningsanlæg
- Demonstrationsprojekt for afløbssystem
- Demonstration af potentiale ved koblede energi- og vandsystemer på større skala gennem eksempelvis en special aggregator
- Analyse af potentiale for smart styring af pumpestationer
- Analyse af spildevandsafgift/elafgift i forhold til bæredygtig styring af spildevandssystemer

⁵⁶ Stentoft, P. A., Munk-Nielsen, T., Vezzaro, L., Madsen, H., Mikkelsen, P. S., & Møller, J. K. (2019). Towards model predictive control: Online predictions of ammonium and nitrate removal by using a stochastic ASM. *Water Science and Technology*, 79(1), 51-62 (<https://doi.org/10.2166/wst.2018.527>).

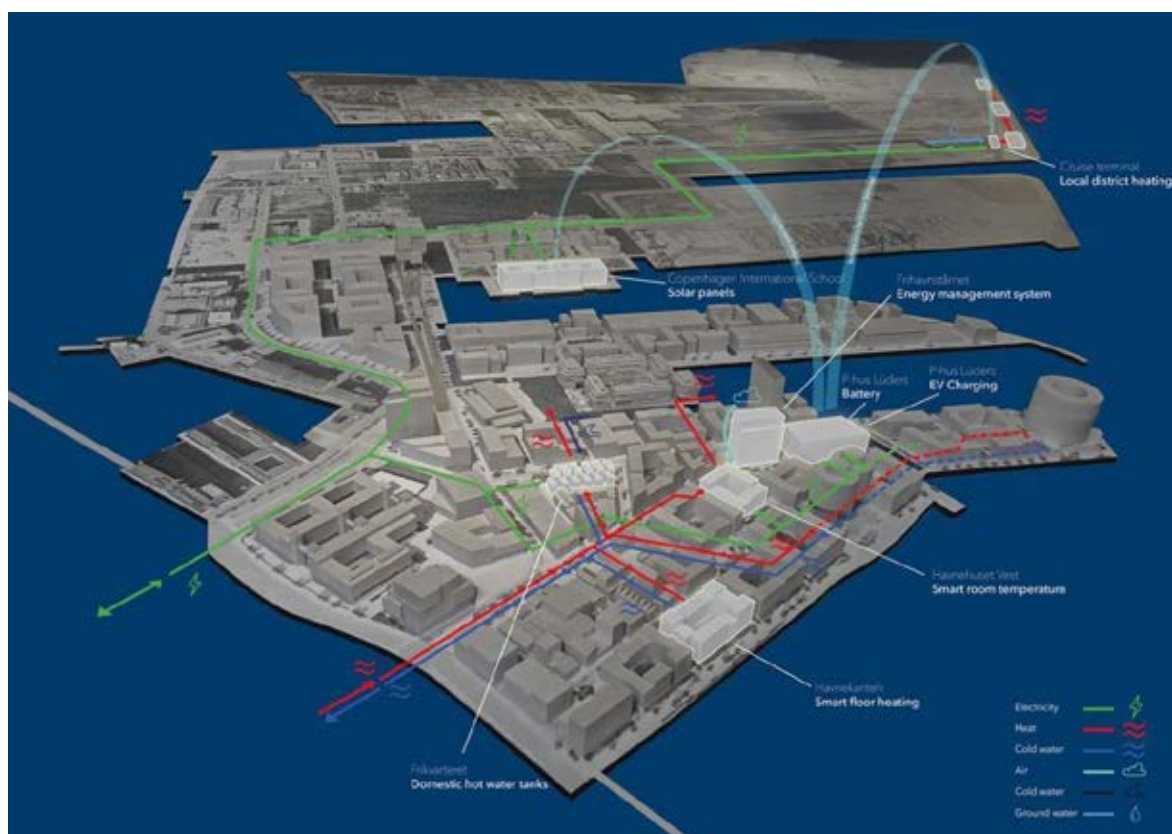
⁵⁷ De Zotti, G., Pourmousavi Kani, S. A., Morales, J. M., Madsen, H., & Poulsen, N. K. (2018). Consumers' Flexibility Estimation at the TSO Level for Balancing Services. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), 1918-1930 (<https://doi.org/10.1109/tpwrs.2018.2885933>) og De Zotti, G., Pourmousavi, S. A., Madsen, H., & Poulsen, N. K. (2018). Ancillary Services 4.0: A Top-to-Bottom Control-Based Approach for Solving Ancillary Services Problems in Smart Grids. *IEEE Access*, 6, 11694-11706.



Energifleksibilitet i alle dele af samfundet er nøglen til en effektiv omstilling til et energisystem drevet af vejret. Figuren viser Fredericia Spildevand og Energi. Håndtering af spildevand bidrager med betydelig fleksibilitet ved rensningen (primært beluftningen), pumpning i kloaksystemet, og endda ofte med en positiv og fleksibel energibalance ifm. produktion af energi baseret på biogas.

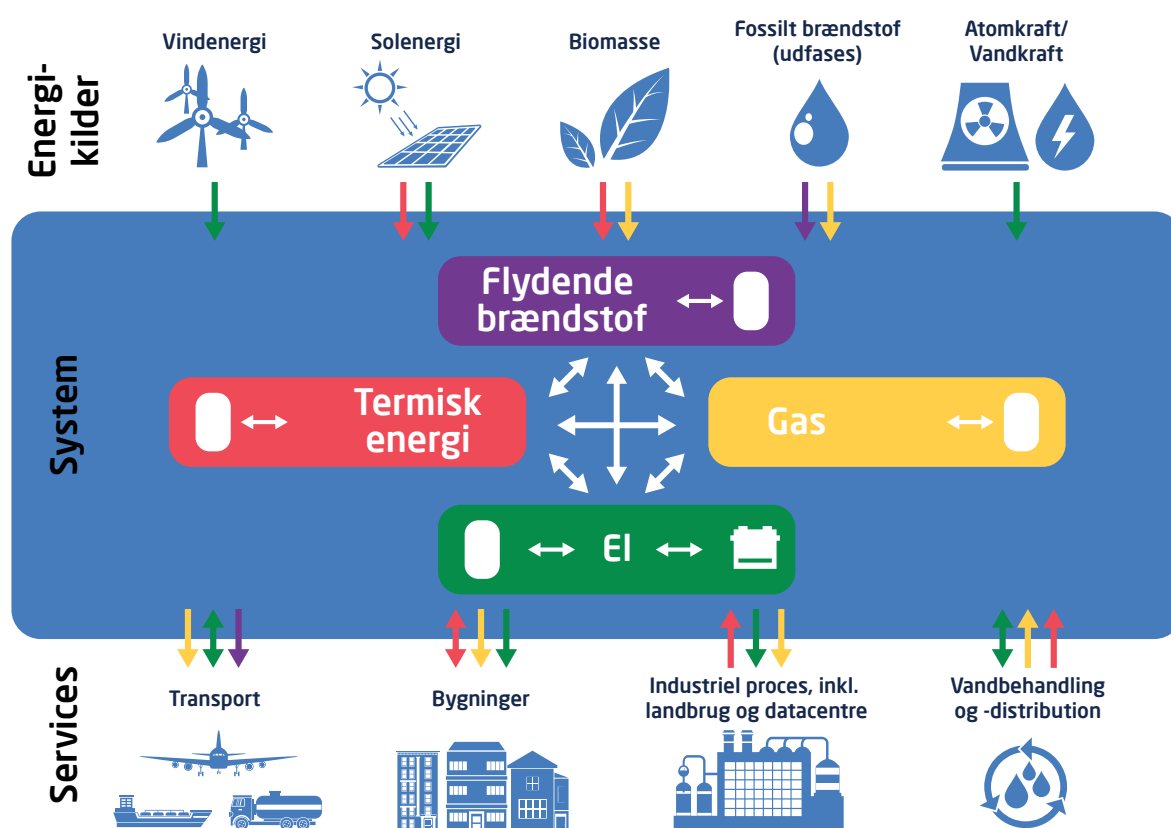


Et af de konkrete Living Labs under Center Danmark er sommerhuse i Blåvand og Blokhuse med svømmepøl, som udlejes af Novasol. I sommerhusene er det påvist, at en smart styring kan give 15 % besparelse på CO₂-udledning af den forbrugte strøm.



I Københavns Nordhavn har projektet EnergyLab Nordhavn i 4,5 år demonstreret, hvordan sektorkobling af el, varme og gas er muligt. Foto: Torben Nielsen.

Anbefalinger



Figur 11. DTU Sektor-koblingsmodellen

Anbefalinger til forskning og udvikling

Den helt overordnede anbefaling er, at aktørerne i energisektoren, innovative digitale virksomheder og universiteter går sammen om flere fælles og meget større strategiske satsninger for udvikling af sammenhængende Smarte Energisystemer i Danmark og internationalt. Specielt er det vigtigt at erkende, at fleksibiliteten fremadrettet i øget grad skal flyttes fra produktionen til forbruget, og derfor er oplagte fokusområder transport, bygninger og

industrielle processer i industri (inkl. landbrug og datacentre) og i vandbehandling og -distribution. Der bør forskes i aspekter vedrørende integration af energiteknologier i Smarte Energisystemer, ud over forskningen i de enkelte lagrings- og konverteringsteknologier. Satsningerne kan tænkes gennemført i de nye planlagte testzoner, som skal give mulighed for test af nye og alternative rammebetingelser.

Der er fokuseret på forskning og udvikling, der skal udføres i dag, og som kan bidrage til løsninger i 2030 samt lægge fundamentet for løsningerne i 2050. Det er i denne sammenhæng vigtigt at påpege, at selv den mere kortsigtede forskning skal rumme et 2050-perspektiv, således at de kortsigtede investeringer kommer til at flugte med behovene efter 2030 frem mod 2050.

1) Der skal forskes i udvikling af platforme til sektorkobling

Forskningen har vist, at der eksisterer betydelig fleksibilitet, som kan mobiliseres gennem sektorkobling, dvs. på tværs af sektorer som el, gas, varme, mobilitet etc. - og at energisystemet kan optimeres ved en bedre koordineret og mere integreret drift af de forskellige infrastrukturer. Og forskningen peger på, at samfundsgevinsterne ved at udnytte fleksibiliteten på tværs af sektorer er meget betydelige, hvis fleksibiliteten på tværs af el, gas, varme/køling og mobilitet udnyttes. Fx forventes de samfundsøkonomiske omkostninger for den grønne omstilling specifikt for Power2Heat i Danmark at være minimum 5 % mindre i 2030 og minimum 15 % mindre i 2050⁵⁸. Forskningen understøttes kraftigt af analyser i Klimapartnerskabet for Energi- og forsyningssektoren, som viser, at indfrielsen af 70%-målsætningen for reduktion i CO₂-udledning som helhed vil blive 31 mia. kr. billigere og 28 % lavere med Smarte Energisystemer (et fald fra 110 mia. kr. til 79 mia. kr.).⁵⁹

Det udestår dog at udvikle de systemarkitekturer og kombinationer af markeds- og styringsbaserede platforme baseret på intelligent udnyttelse af data, der effektivt og billigt kan sikre et mere integreret energisystem blandt andet gennem veldefinerede og hensigtsmæssige services og interfaces mellem aktørerne.

Gennem forskning skal der udvikles digitale platforme, som ved hjælp af AI, big data og IoT-løsninger kan realisere en ny systemarkitektur, der muliggør en effektiv kobling mellem sektorer. Med andre ord skal der tilvejebringes et nyt digitalt lag oven på det fysiske energisystem, der bidrager til optimering af det samlede system. De nye data-intelligente platforme skal være i stand til at håndtere mangeartede aspekter inklusiv funktionalitet, der rækker ud over energi.

2) Der skal forskes i udvikling af metoder og software til at mobilisere fleksibilitet, herunder fleksibilitetsprodukter

Fleksibilitet kan være en værdifuld ressource, som kan anvendes til mange væsentlig forskellige funktioner i energisystemet, både på systemniveau og i de lokale forsyningsnet. Forskningen har vist, at der eksisterer betydelig fleksibilitet i el-, gas- og varme-forbruget, som kan aktiveres af forskellige kontrol- og markedssignaler. Der skal forskes i Power-to-X-løsninger samt løsninger, som effektivt kan udnytte adgangen til bæredygtige kulstof- og CO₂-kilder. Med adækvate digitaliseringer vil disse konverterings- og sektorkoblinger lede til ekstra fleksibilitets- og lagringsmuligheder af en størrelse, som formodentlig vil være afgørende for den planlagte storskala udbygning med sol og specielt offshore vind.

Da fleksibiliteten skal mobiliseres i alle dele af samfundet og hos mange forskellige typer af forbrugere (smarte bygninger, fuldt elektrificeret vejtransport, rensningsanlæg, væksthuse, supermarkeder, mv.), er der behov for at undersøge, hvorledes dette spektrum af fleksibilitet bedst bringes i spil, og på en måde som sikrer, at ønsker og behov hos alle typer af forbrugere tages i betragtning. Denne mobilisering skal indeholde muligheder for sektorkobling på brugerniveau.

For at kunne mobilisere og udnytte fleksibiliteten optimalt er det dog nødvendigt med forskning i samspillet mellem aktører, udformningen af systemstøttefunktioner, udveksling af fleksibilitetsydelser via markeder og styringskoncepter samt styring af de enkelte fleksibilitetsenheder. Der bør ske en udvikling af koncepter som fx kontrol-baserede, hierarkiske/distribuerede, direkte/indirekte, transaktions-baserede og peer2peer. Der bør inkluderes, hvorledes den stokastiske natur af fleksibiliteten kan indgå i beskrivelsen af fleksibilitetsydelserne.

Der er behov for at klarlægge, hvordan fleksibilitet kan integreres i planlægning og drift, så der tages hensyn til usikkerhed på kort og lang sigt, og der er behov for at klarlægge, hvordan der kan sikres en robust drift under både normale forhold og i mere ekstreme situationer. Yderligere er det væsentligt at afklare, hvordan konfliktende behov mellem lokale og globale behov løses, og hvordan det sikres, at det er

⁵⁸ https://smartenergysystems.eu/wp-content/uploads/2019/09/27-1_MarieMunsterSESAAU2019.pdf

⁵⁹ Regeringens Klimapartnerskaber: Energi- og forsyningssektoren. I mål med den grønne omstilling 2030. Sektorkøreplan for energisektorens bidrag til 70%-målsætningen. Marts 2020.

gennemsigtighed i leverance af fleksibilitet og afregning.

Der er brug for forskning i metoder til karakterisering af fleksibilitet, og en karakterisering som tager højde for såvel dynamik som usikkerhed. Yderligere er der behov for forskning i, hvorledes fleksibiliteten kan mobiliseres gennem eksempelvis kontrol- og markedsbaserede metoder. Endelig er der brug for forskning i at få klarlagt fordele og ulemper ved forskellige kommunikationsløsninger i forhold til barrierer for mobilisering af fleksibiliteten i alle dele af samfundet, og i forhold til at kunne respektere krav ift. GDPR og privacy.

3) Der skal forskes i afgiftsstrukturer, der understøtter fleksibilitet og effektivitet samt er fair for forbrugerne

Der skal skabes et nyt, enklere og bedre afgiftssystem, som kan accelerere den grønne omstilling.

Her er det vigtigt, at der fremover er lige konkurrence ift. CO₂-beskatning imellem energiformerne. Fossile brændsler vil have en konstant CO₂-udledning og derfor en konstant (høj) afgift i et fremtidigt afgiftssystem. En høj CO₂-afgift vil tilskynde til at reducere elforbruget, når CO₂-aftrykket fra elproduktion er højt og øge elforbruget, når CO₂-aftrykket er lavt.

I lyset af dette er der brug for forskning i, hvorledes nye afgiftsstrukturer skal designes for at understøtte fleksible og effektive løsninger under hensyntagen til såvel systemstrukturer, forbrugerbeskyttelse som en behovsrelateret finansiering af infrastrukturen.

Der er også behov for forskning i, hvorledes forskellige forbrugersegmenter i praksis reagerer på variable afgifter samt i, hvorledes variable og dynamiske priser vil påvirke forbrugsprofilen for de nye elforbrugskategorier såsom elbiler og Power-to-X løsninger.

Denne viden kan konkret tilvejebringes ved at gennemføre analyser baseret på virkelige testområder

med realistiske forhold og forskelligartede rammebetingelser, herunder alternative markedsdesign og afgifter. Det er vigtigt, at disse sandkasseprojekter for test af rammebetingelser er både skalérbare og repræsentative.

Som det sidste i denne sammenhæng skal der forskes i, hvordan prisudviklingen bliver, når meget store nye elforbrug til lagre, brint elektrolyse, Power-to-heat, P2X, datacentre osv., der alle forventer at købe de billigste timer, bliver en del af det Smarte Energisystem.⁶⁰⁶¹

4) Der skal forskes i tarifstrukturer, der på en og samme tid understøtter fleksibilitet og sikrer økonomisk efficiens og stabilitet i forsyningsnettet

I og med at større dele af forbruget i fremtiden vil reagere på varierende energipriser, vil optimal udnyttelse af netkapaciteten blive et mere dynamisk problem. De tidsvariable tariffer kan muligvis føre til utilsigtede variationer i belastningen af elnettet, men de kan ved fornuftigt design også være med til at afhjælpe de problemer, man kan frygte eksempelvis ved stor lokal og decentral produktion. De nettatariffer, som den enkelte kunde betaler, bør i princippet afspejle den andel af omkostningerne til nettet - på det aktuelle tidspunkt og de aktuelle steder i nettet - som de giver anledning til.

Med indførelsen af de timeafleste målere og de muligheder i nye digitale styringskoncepter, der opstår som følge heraf, følger et behov for at udvikle på tarifstrukturerne, så de kan fungere bedre sammen med de ny digitale styringskoncepter, energimarkeder, markeder for fleksibilitet osv.

På denne baggrund er der behov for forskning i tariffer, der er dynamiske i tid og/eller sted, og som understøtter fleksibilitet - bl.a. ved at fungere ifm. de nye digitale styringskoncepter - og sikrer økonomisk efficiens og stabilitet i netsystemet.

⁶⁰Dansk Energi er enig med DTU i, at afgiftssystemet omkostningseffektivt bør understøtte klimamål. På elområdet er den fossile produktion af el pålagt afgifter gennem det Europæiske kvotesystem. Dermed skabes et ikke konkurrenceforvridende incitament til at udskifte de fossile brændsler. Det er det primære redskab til den grønne omstilling af elsystemet. Afgifter på el i forbrugerleddet tjener i dag et provenumæssigt formål. Hvor vidt en ændring i struktur for disse afgifter er formålstjenligt, vil være omkostningseffektivt eller understøtte et velfungerende elsystem er ikke givet, men kræver mere omfattende analyser.

⁶¹DI er enig med DTU i, at Danmark bør indrette afgiftssystemet således, at det understøtter den grønne omstilling og Danmarks klimaambitioner frem mod 2030 og 2050. I lyset af den vedtagne udfasning af PSO-afgiften og stadig lavere elafgift stiller DI sig imidlertid tvivlende over for behovet for at indføre variable afgifter for at påvirke forbruget (kvoteprisen eller CO₂-afgiften på evt. fossilt input vil tjene dette formål). Det reelle behov og effekter her af bør analyseres nærmere. Endvidere mener DI, at risikoen for CO₂-lækage bør tages meget alvorligt. Danmark er ikke et forgangsland, hvis vi reducerer vores CO₂-udledning ved, at Danmark eksporterer CO₂-udledning til andre lande. Det er en løsning, som koster vækst, velstand og arbejdspladser, og som ikke gavner det globale klima.

5) Der skal forskes i forbruger-fokuserede løsninger og nye forretningsmodeller, der skaber involvering og værdiskabelse for kunderne

Den hidtidige forskning i intelligente energisystemer har haft stort fokus på de teknologiske løsninger, der skal til i produktionssystemet, i forsyningsnetten og i forbrugsleddet for at muliggøre et energisystem med meget høj andel af vedvarende energi. Der er et uudnyttet potentiale for at tænke forbrugerne bedre ind i løsningerne og i højere grad tage udgangspunkt i forbrugernes behov og ønsker, så de får flere valgmuligheder omkring deres energi end i dag. Det vil forbedre deres muligheder for at tage effektiv og aktiv del i den grønne omstilling, potentielt øge deres engagement og ejerskab til omstillingen og dermed accelerere udviklingen af et bæredygtigt energisystem.

For at dette kan realiseres, er der brug for forskning i nye bruger-centrerede løsninger med tilknyttede forretningsmodeller. Desuden for bedre forståelse af forbrugerne, blandt andet relateret til kontrol-baserede styringskoncepter, peer2peer energiudveksling og innovative metoder for datadeling. Sådanne redskaber kan anvendes til at udnytte fleksibilitetspotentialet hos forbrugerne, herunder at mobilisere dem og tilbyde dem nye valgmuligheder omkring eget energiforbrug. En sådan udvikling fordrer en massiv digitalisering svarende til den udvikling, der er sket i telesektoren gennem de sidste 15-20 år.

6) Der skal forskes i sikring af robusthed af decentraliserede og internationaliserede Smarte Energisystemer

Med decentralisering og internationalisering følger mere fluktuerende driftsbetingelser, sårbarhed over for cyberangreb og anvendelse af helt nye teknologier og enheder, som kan udgøre ukendte kilder til ustabilitet. Så der er behov for forskning i, hvordan Smarte Energisystemer skal designes for at kunne modstå og reducere omfanget af og varigheden af forstyrrende hændelser. Desuden systemernes evne til at forudsige, absorbere, tilpasse sig og/eller hurtigt nå tilbage til høj forsynings sikkerhed igen.

Den nuværende forskningsindsats fokuserer på udvikling af metoder, der er i stand til at analysere systemets tilstand og modstandsdygtighed overfor forstyrrende hændelser i realtid, og som dermed er tilstrækkeligt hurtige til at håndtere mere dynamiske og fluktuerende driftsbetingelser. Forskningen har leveret nogle individuelle metoder, der hver for sig giver indsigt på nogle delområder af det samlede billede af systemets stabilitet og robusthed.

Der er behov for en fremtidig forskningsindsats inden for intelligente og autonome realtidssystemer der, på basis af igangværende forskning, danner et samlet billede af systemets overordnede driftssikkerhed og robusthed mod forstyrrende hændelser, forudser deres indflydelse på systemdriften og identificerer effektive kontrolhandlinger for at undgå ustabilitet og systemnedbrud. Tidshorisonten for realtidsanalyser skal udvides ved integrering af vejrprognoser. Ligeledes er et behov for udvikling af avancerede adaptive kontrol- og beskyttelsessystemer, der fokuserer på at forbedre systemernes evne til at modstå og reducere omfanget af forstyrrende hændelser og en fortsat forskning i Smart Grid-teknologier og smartere RES-generation, der bidrager direkte til øget robusthed (fx ø-drift af microgrid, black-start kapacitet, hurtig frekvensstøtte osv.). Sidst men ikke mindst er der behov for forskning i, hvordan nye teknologier i det fremtidige system introducerer endnu ukendte stabilitetsmekanismer, der kan true systemets modstandsdygtighed.

7) Der skal forskes i udvikling af nye modeller til optimering af investeringer og drift specifikt i en Smart Energisystem sammenhæng og i opgørelse af samfundsøkonomisk nytteværdi

Der eksisterer i dag veludviklede modeller til optimering og analyse af det danske energisystem, eksempelvis Balmorel-modellen der med stor opløsning både tidsligt og rumligt kan gennemføre analyser og opstille scenarier på såvel kort som langt sigt. Men karakteristisk for denne model-type er, at de tager udgangspunkt i en meget detaljeret energiforsynings-side, mens energiforbruget generelt er forholdsvis enkelt og statisk repræsenteret. Dette er en stor mangel i en Smart Energy sammenhæng, hvor fleksibilitet i energiforbruget er af afgørende betydning både i drift-situationer og ved bestemmelse af det fremtidige investeringsbehov i det samlede system. Der er derfor behov for forskning i enten 1) en signifikant videreudvikling af de eksisterende modeller med en forbrugsside, der afspejler de potentielle muligheder i et fleksibelt og dynamisk energiforbrug, eller i 2) udvikling af separate og detaljerede fleksibilitetsmodeller for energiforbruget, der enten kan hard- eller soft-linkes med de eksisterende energisystem-modeller.

Herudover skal der forskes i, hvilke Smarte Energisystemer der resulterer i markant billigere og bredere anvendelse af vedvarende energi, produktivitetsforbedringer i dansk industri og øget forbrugervelfærd.

Til supplement af de nuværende planlægningsmetoder, som stort set altid fokuserer på økonomisk optimale løsninger, er der i fremtiden brug for en udvikling af metoder, som giver mulighed for en optimere ift. bæredygtighed. I den sammenhæng skal eksempelvis miljøpåvirkninger over den samlede levetid tages i betragtning.

8) Gør adgangen til data bedre og muliggør innovation

Gennem de senere år er der sket store fremskridt ift. adgang til specielt historiske data (et godt eksempel er Data Hub'en hos Energinet for elforbrugsdata). Der er behov for udvikling af platforme, som giver en bedre adgang til såvel historiske data som streaming data, dvs. data i næsten real-tid. Der er også brug for platforme, som kan favne alle de data, som kan være relevant for at mobilisere den nødvendige fleksibilitet for den grønne omstilling. Desuden er der behov for platforme, som giver mulighed for tovejskommunikation ift. udveksling af data.

Der skal udvikles nye digitale platforme, som kan understøtte en 'trusted data sharing economy', og som inkluderer aktørerne i energisektoren generelt, innovative digitale virksomheder og universiteter. Sammen skal der etableres en national sandkasse model for forskning, udvikling, innovation og test af nye digitale løsninger for Smarte Energisystemer og rammebetingelser. Dette skal ske for at accelerere den grønne omstilling samtidig med, at der skabes et grundlag for innovation og en ny global styrkeposition for det danske erhvervsliv og universiteter.

9) Der skal forskes i aspekter vedrørende integration af energiteknologier i Smarte Energisystemer

Der skal udføres forskning, der klart fastslår de præcise krav til fremtidens energiteknologier, for at disse kan integreres i det Smarte Energisystem. I den forbindelse skal der sættes på teknologier, som egner sig til at dække det faktiske behov for stor-skala fleksibilitet, som skabes af skiftende vejrforhold, på både korte og lange tidsskalaer. Resultatet af en sådan forskning vil være en klar indikator på hvilke energiteknologier, som det bedst kan svare sig, at danske universiteter og virksomheder bedriver forskning og udvikling i. Fremtidens vejrdrivne energisystem kalder på forskning i integration, som indebærer satsninger på Power-to-X og konverteringsløsninger, samt løsninger som indebærer en bedre udnyttelse af overskudsvarme og bæredygtige

kulstof- og CO₂-kilder. Komplexiteten af disse integrerede energisystemer kalder på en øget anvendelse af digitalisering og kunstig intelligens til bla. modellering, prædiktions og optimering.

Anbefalinger om rammebetingelser og uddannelse, test, demonstration og innovation

10) Bedre rammebetingelser for forsyningsselskaberne

Det er nødvendigt at ændre rammerne for forsyningsselskaberne. Som rammerne er nu, belønner de fokus på drift i en grad, der er stærkt begrænsende for mulighederne for at afsøge nye veje i samarbejde med de øvrige aktører i økosystemet. I betragtning af den omstilling, sektoren nu står over for, er det afgørende, at selskaberne får en incitamentsstruktur, der giver dem mulighed for at gå på to ben samtidigt - drift og udvikling - og dermed bedre mulighed for at deltage i forsknings- og innovationsprojekter.

11) Behov for opmærksomhed om grøn omstilling i andre lande

Der er behov for opmærksomhed om sammenhængen mellem grøn omstilling i andre lande, gennemslagskraft af forskning, fokusering af forskning på lokaliserede behov og udvikling i danske forskningsbevillinger. Der er grund til at forholde sig til sammenfaldet mellem på den ene side udviklingen i eksport og i markedsandele, fald i gennemslagskraft af forskning, fokusering af forskning på lokaliserede behov og på den anden side fald i forskningsbevillinger. Faldet i eksport og i markedsandele kan meget vel have baggrund i bl.a. fald i forskningsbevillinger.

12) Efteruddannelse og opmærksomhed om kombination af fagligheder

Der er behov for efteruddannelse af kandidater i kombination af fagligheder på tværs af energiteknologi, styring ved hjælp af digitalisering og dynamiske planlægningsværktøjer.

Det står klart, at udvikling og drift af Smarte Energisystemer er dybt afhængig af en kombination af mange forskellige discipliner og fagligheder. Det gælder fx en kombination af dyb faglighed om energiteknologi, modellering, forecasting og kontrol vha. digitalisering og dynamiske planlægningsværktøjer. Det kan derfor være en god idé at tilbyde efteruddannelse af kandidater, så de mestrer den dybe faglighed og evner at kombinere med bl.a. disse andre fagligheder, når de løser deres arbejdsopgaver.

13) Test- og demonstrationsprojekter, lokaliserede behov og forretningsmodeller

Danmark er et energiteknologisk foregangsland, og vi har med stor succes formået at lade omstilling af vores energisystem gå hånd i hånd med erhvervsudvikling og eksport. Danmark har en unik mulighed for at udbygge denne position inden for smart energi, fx omkring nye service-baserede forretningsmodeller, platformøkonomi og hierarkiske kontrolbaserede løsninger.

Test- og demonstrationsprojekter har hidtil været instrumentelle i udviklingen, og det er afgørende, at Danmark fortsat satser på fysiske testplatforme - fra laboratorieskala, hybrid-eksperimenter med hardware-in-the-loop til fulde living labs - der udbygges med nye digitale lag (IoT, AI, analytics, distribueret beregning, mv.), og som kan være grundlag for udvikling, innovation og demonstration af løsninger inden for Smarte Energisystemer.

For effektivt at teste fremtidens intelligente energiløsninger er der dog behov for en nyudvikling af testmulighederne. Det er vigtigt, at der i fremtiden bliver mulighed for at teste ikke blot teknologi, men også rammebetingelser i samspil med teknologierne. Reguleringsmæssige rammebetingelser udgør en barriere for mange af de nye løsninger inden for smart energi, da reguleringen ikke tager højde for de nye teknologier og anderledes forretningsmodeller. Det er således behov for reguleringsmæssige testzoner, der vil kunne skabe værdifulde erfaringer og accelerere omstillingen. De rammebetingelser, som skal undersøges, omfatter tekniske forskrifter, markedsregler, tarifstrukturer og energifgifter. Det er vigtigt, at forsøgene i testzonerne designes, så løsningerne let kan skaleres op, er repræsentative og dermed kan udrulles. Det er ligeledes vigtigt, at flere forskellige løsninger kan demonstreres i et integreret samspil, da det især er i samspillet mellem løsningerne, der er behov for nyudvikling. Der vil være behov for både tematiske og geografiske testzoner i form af rigtige living labs, hvor dokumentationsmuligheder er til stede gennem målesystemer, og samspillet mellem flere deløsninger naturligt kan testes.

Der er i tilknytning hertil behov for at udvikle modeller for effektiv lokalisering af de intelligente energiløsninger, bl.a. understøttet af aftestning under alternative reguleringsmæssige rammer. Dette vil bidrage til at enkeltløsningerne effektivt kan eksporteres til andre lande, som måske kan have en anderledes systemarkitektur og andre reguleringsmæssige rammer.

14) Finansiering af forskning i selve systemaspektet og i enablere af Smarte Energisystemer

Den strategiske forskning er udfordret af en række forhold, herunder (a) fokus på kort vej til monetær værdiskabelse i virksomheder, (b) en tendens til at prioritere kortsigtet produktinnovation over anden innovation, herunder inden for udvikling af præ-kompetitive teknologier, procesinnovation mv. og (c) en tendens til at fokusere mere på virksomheders muligheder og business cases for enkelte virksomheder end på de store samfundsmæssige udfordringer der kan have langt større samfundsmæssige implikationer og effekter.

Erfaringen er derfor ikke overraskende, at det er særligt udfordrende at opnå finansiering af forskning i selve systemaspektet og af forskning i enablere af Smarte Energisystemer. I sagens natur hæmmer indretningen af fundingsystemet dermed forskning og innovation i Smarte Energisystemer og begrænser dermed også mulighederne for, at Danmark kan opfylde 2030 målet om at reducere CO₂-udledningen med 70 % ift. 1990 niveauet.

Fundingsystemet bør derfor indrettes på en måde, så der kan opnås finansiering af forskning i selve systemaspektet og af forskning i enablere af Smarte Energisystemer.



Bornholm er unik som testø, da demografi og fysisk infrastruktur er en minimodel af resten af Danmark. Derudover har øen en stor andel vedvarende energi og et energisystem, der både kan køre i ødrift og opkoblet med søkabel til det nordiske net. Foto: Torben Nielsen.



Center Danmark: Ny hub for digitaliserede og koblede energisystemer, som gennem et nyt nationalt samarbejde skal sikre, at hele Danmark kan udvikle, teste og implementere løsninger for en acceleration af den grønne omstilling gennem grøn vækst.

Appendiks 1-5

Appendiks 1

Figur 12. Forudsætninger, data og beregningsgrundlag for oversigt over CO₂-reduktion potentialet i 6 Smarte Energisystem cases, tidshorisont for effekt og forskningsbehov.

Case	Forudsætninger
Case A – Fuldt elektrificeret vejtransport	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Personbiler og varevogne samt lastbiler vil forbruge 160 PJ fossil energi om året, og udlede 12 Mton CO ₂ /år. Med gennemgribende elektrificering af vejtransporten kan dette i princippet nedbringes til 40 PJ elektricitet som vil medføre* udledning af 0.82 Mton CO ₂ /år. Altså en reduktion på 75% på energiforbrug og 93% på CO ₂ . Grundantagelser: *Ved anvendelse af basisfremskrivningens 2030 CO ₂ intensitet for elektricitet i Danmark på 74 g CO ₂ /kWh. Der er regnet med, at en BEV kører 4 gange så langt som en ICEV på en enhed energi i "tanken".
Case B – Sektorkobling mellem el og fjernvarme	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Fjernvarmesystemet vil bruge 35 PJ fossil energi om året, og udlede 2.8 Mton CO ₂ /år. Ved at levere den samme energi "smart" og med øget integration af varmepumper kan dette i princippet nedbringes til 14 PJ elektricitet som vil medføre* udledning af 0.29 Mton CO ₂ /år. Altså en reduktion på 60% på energiforbrug og 89% på CO ₂ . Grundantagelser: *Ved anvendelse af basisfremskrivningens 2030 CO ₂ intensitet for elektricitet i Danmark på 74 g CO ₂ /kWh. COP for fjernvarmeproduktion er sat til 2.5. Note: Fjernvarmenettet rummer et betydeligt potentiale for lagring af overskydende elektricitet i vinterhalvåret hvilket kan gøres yderst billigt. Bemærk at en betydelig del af fjernvarmens energiforbrug i dag består af biomasse, som ikke altid kan regnes for CO ₂ -neutral.
Case C – Bygningsmasse	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Rumvarme i husholdninger og erhverv vil forbruge 34 PJ fossil energi om året, og udlede 2.0 Mton CO ₂ /år. Med "smarte" varmepumper og evt. lokale mellemlagre for varme kan dette i princippet nedbringes til 8.5 PJ elektricitet som vil medføre* udledning af 0.17 Mton CO ₂ /år. Altså en reduktion på 75% på energiforbrug og 92% på CO ₂ . Grundantagelser: *Ved anvendelse af basisfremskrivningens 2030 CO ₂ intensitet for elektricitet i Danmark på 74 g CO ₂ /kWh. COP for rumopvarmning er sat til 4.

Case	Forudsætninger
Case D - Elektrificering og integration af industriens processer	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Mellemtemperaturprocesser vil forbruge 40 PJ og højtemperaturprocesser yderligere 15 PJ fossil energi om året, hvilket giver anledning til en udledning på 4.1 Mton CO₂/år. Mellemtemperaturprocesserne kan elektrificeres og delvis køres på varmepumper, mens højtemperaturprocesserne skønsomt kan elektrificeres for 50% vedkomende, men varmepumper finder ingen anvendelse for højtemperaturprocesser. Sådanne tiltag kan i princippet nedbringe energibehovet for procesvarme til 27 PJ elektricitet samt 2.1 TWh fossil energi som vil medføre* udledning af 1.1 Mton CO₂/år. Altså en reduktion på 36% på energiforbrug og 73% på CO₂. Grundantagelser: *Ved anvendelse af basisfremskrivningens 2030 CO₂ intensitet for elektricitet i Danmark på 74 g CO₂/kWh. COP for mellemtemperaturprocessor er sat til 2.
Case E - Sektorkobling mellem el og gas	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Basisfremskrivningen indikerer et behov for 76 PJ gas (hvoraf de 19 PJ vil være biogas). Samtidig efterlader ikke-elektrificerbare teknologier (fly: 46 PJ, søfart & forsvar: 9 PJ, landbrug & fiskeri: 20 PJ, byggeri: 5 PJ) et restbehov for brændstof på minimum 80 PJ. Med udgangspunkt i gas (biomass+Power-to-Gas) og 100 PJ om året (5.5 Mt årlig CO₂-udledning) 100 PJ gas kan fremstilles syntetisk ud fra 58 PJ biomasse og 96 PJ elektricitet (via 60 PJ H₂ samt 10 PJ procesenergi). Herved øges det samlede energibehov fra 100 PJ naturgas til 154 PJ bio+el, men CO₂-udledningen nedbringes med 3.5 Mt eller 64%. Grundantagelser: *Ved anvendelse af basisfremskrivningens 2030 CO₂ intensitet for elektricitet i Danmark på 74 g CO₂/kWh. Der bliver behov for ca. 4.5 GW elektrolysekapacitet for at levere den nødvendige H₂. Note: Denne sektorkobling er ikke billig, men den er kritisk vigtig for lagring af energi på PJ-skala og dermed for stor integration VE. Den er også nødvendig for at gøre fly mv. uafhængige af fossil energi.
Case F - Vanddistribution og -behandling	Dansk perspektiv Basisfremskrivning 2030 status: Basisfremskrivningen opgør ikke energistrømme for vandsystemet. Det anslås, at vandhåndtering i Danmark allerede er fuldt elektrificeret. Potentialet for smarte energisystemer er derfor i hovedsagen, at integrere det i et "demand response" paradigme, hvor man i kortere perioder med lav vind kan skrue betragteligt ned for vandsektorens elforbrug for at aflaste elnettet. Således kan vandsystemet være en vigtig brik i et smart energisystem, med en meget begrænset investering.

Appendiks 2

Kort redegørelse for bud på en forventet udvikling i specifikke lande

Rivende udvikling i Tyskland

Ifølge den seneste opgørelse fra International Energy Agency (IEA) markerer Europa sig som den verdensdel, hvor det er lykkedes at bryde koblingen mellem økonomisk vækst og øget energiforbrug. Mens den samlede europæiske økonomi voksede med 1,8 % i 2018, steg energiforbruget blot med 0,2 % i Tyskland havde man ligefrem et fald i energiforbruget på 2,2 %⁶².

Den tyske energisektor er midt i en rivende udvikling, hvor man forsøger at gå væk dels fra atomkraft og dels fra store kulfyrede værker. Især har landet gennem en del år haft et markant program for subsidiering af solceller, men også vindkraften og solvarme er prioriteret. Det har naturligt ført til stor interesse for udvikling af smarte energisystemer, herunder lagring og tjenester, der regulerer forbruget. Et eksempel er opladning af elbiler. Også brint og brændselsceller er tyske styrkepositioner.

Svenske og britiske ambitioner

Fra naturens hånd er Sverige rigt forsynet dels med vandkraft-ressourcer og dels med store skovområder, der kan udnyttes til at producere bioenergi. Begge typer vedvarende energi indgår i landets ambitiøse klimamålsætninger. Desuden satser svenskerne blandt andet på programmer, der skal fremme vindkraft og solenergi på kommunalt niveau.

Storbritannien har etableret sig som en af frontløberne inden for digitalisering af elnettet. Det vil sige, at virksomheder og private el-forbrugere er udstyret med målere og termostater, der kan hjælpe med at balancere elnettet i forhold til forbruget. Samtidig bliver forbrugerne på denne måde motiveret for at skubbe deres forbrug i tid til tidspunkter, hvor der er rigeligt med elproduktion. Også varmemforsyningen samt energilagring er britiske fokusområder. Endelig er Storbritannien et af de lande, der satser massivt på offshore vindenergi samt på den såkaldte CCS-teknologi (Carbon Capture and Storage). Det vil sige tekno-

logi, der indfanger CO₂ på kulfyrede kraftværker med henblik på at pumpe denne drivhusgas ned i undergrunden for at beskytte klimaet.

Californien og Kina satser digitalt

Uagtet at USA for nyligt har meldt sig ud af den internationale Paris-aftale, der handler om beskyttelse af klimaet, investerer en række amerikanske delstater i vindkraft og andre former for vedvarende energi. Især er Californien ambitiøs med programmer blandt andet inden for batterier med tilstrækkelig kapacitet til at kunne bidrage til at balancere elnettet samt brint-teknologi og brændselsceller, der kan erstatte benzin og diesel i transportsektoren. Endelig er Californien langt fremme inden for løsninger, hvor energiforbruget i bygninger gøres fleksibelt, så hovedparten af forbruget ligger på tidspunkter med rigelig mængde vedvarende energi.

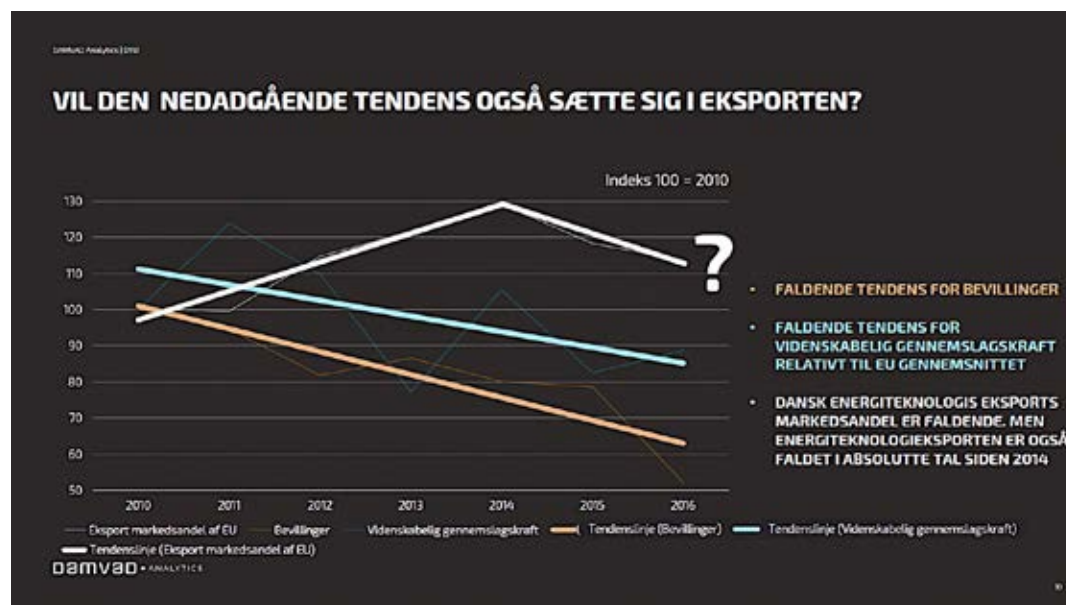
Appetitten på energi er stor i Kina, der i en række år har været verdens vækstlokomotiv. Ca. en femtedel af hele verdens investeringer i energi foregår i Kina. Samtidig er det en markant nyere tendens, at man ikke længere overlader det til kulkraften at dække væksten i forbruget. Faktisk faldt investeringerne i kulkraft med 55 % i 2017. I stedet investerer landet massivt i vindkraft, vandkraft, atomkraft samt i kraftvarmeværker. Desuden er Kina i gang med at etablere et omfattende net af lade-stationer til elbiler. De kinesiske ambitioner omfatter i øvrigt også en global lederrolle inden for en række IT-discipliner, herunder kunstig intelligens (AI) og Big Data. Der er derfor al mulig grund til at forvente, at Kina vil blive en markant spiller inden for digitale løsninger til energisektoren, herunder intelligente elmålere mv.⁶³

⁶² Kilde: "Global Energy & CO₂ Status Report 2018"; IEA

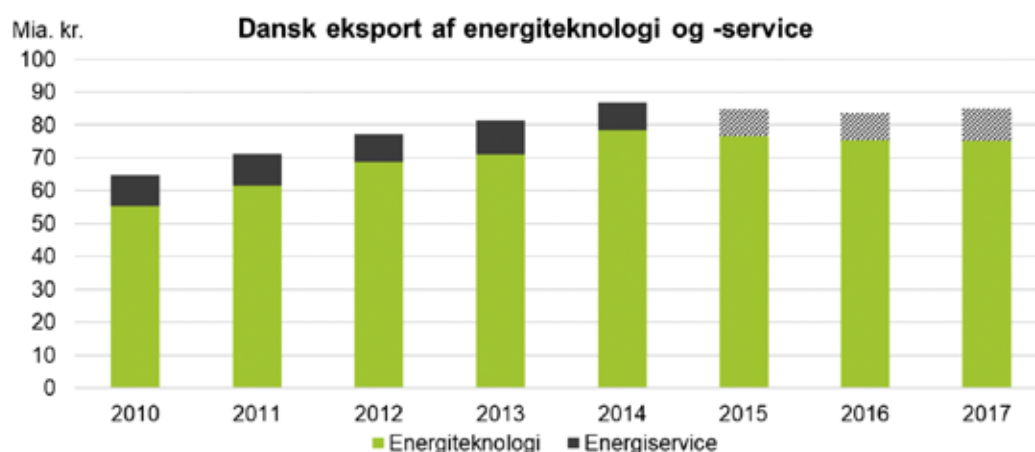
⁶³ IRIS Group, CLEAN og Innovationsnetværket Smart Energy (2019): Energiteknologiklyngen - En styrkeposition i vækst.

Appendiks 3

Data om forskningsfinansiering, videnskabelig gennemslagskraft og dansk energiteknologie eksports markedsandel 2010-2016.



Figur 13. Udvikling i forskningsfinansiering, videnskabelige gennemslagskraft og dansk energiteknologis eksports markedsandel 2010-2016 (Kilde: Damvad Analytics (2018): Er den danske styrkeposition inden for energiteknologi udfordret?).



Anm.: Eksporten er i løbende priser. Data er revideret i 2018. Eksporten af service på virksomhedsniveau i 2015-2017 er fremskrevet på baggrund af udviklingen i branchernes samlede eksport og andel af serviceeksport, jf. bilag.
Kilde: Beregninger foretaget af DI, Dansk Energi og Energistyrelsen

Figur 14. Dansk eksport af energiteknologi og -service (Kilde: DI, Dansk Energi og Energistyrelsen (2018): Eksport af energiteknologi og -service 2017).

Appendiks 4

Illustrative cases fra sektoren

Case: Modstrøm

Elselskabet der går mod strømmen

Virksomheder opfordrer sjældent forbrugerne til at købe mindre af deres produkter. Modstrøm er en undtagelse.

Den billigste og mest klimavenlige kilowatt-time er den, som forbrugeren kan slippe for at bruge. Det er udgangspunktet for Modstrøm Danmark A/S, der leverer strøm til private forbrugere og virksomheder, men samtidig aktivt bestræber sig på at nedbringe kundernes samlede energiforbrug.

"Vi tager udgangspunkt i en vision om, at bæredygtighed skal kunne betale sig. Derfor er vi mere end leverandør af energi. Vi er en sparringspartner for vores kunder. Vi hjælper dem med at forholde sig til deres forbrug, så de både sparer på energien og energiforbedrer deres bolig eller erhvervslokaler," siger adm. direktør Anders Millgaard, Modstrøm.

Modstrøm er aktiv i hele Danmark.

"Som Danmarks første uafhængige energiselskab bærer vi vejen for et mere fleksibelt og konkurrencedygtigt el-marked til gavn for forbrugerne og for klimaet," siger Anders Millgaard.

Digitale løsninger er vigtige, når forbrugerne fremover skal mindske deres forbrug, mener han:

"Digitalisering kan være et middel til bedre styring, så man ved hjælp af aggregatorer kan levere bedre løsninger til kunderne. Vi skal indsamle flere data ude hos kunden, men vel at mærke bør det være kunden selv, der har kontrollen. I dag er det netselskaberne, der ejer målepunktet. Det burde i stedet være kunden."

Samtidig er der behov for større klarhed om rammerne, understreger direktøren:

"Der er stor usikkerhed i sektoren om, hvilke rammebetingelser, der vil komme til at gælde. Det lægger en dæmper på, hvor meget man vil investere. Det er i højere grad usikkerheden om rammebetingelser end usikkerheden om teknologi, der er en hæmsko."

www.modstroem.dk

Case: Dansk Energi

Elbiler kræver stærkere elnet

Dansk Energi har opgjort prisen for at gøre el-systemet klar til en fremtid med mange elbiler på vejene.

Frem mod 2030 skal der reinvesteres 29 mia. kr. i distributionsnettet for at opretholde den nuværende kvalitet. Hertil kommer der en ekstra investering på mellem 3 og 19 milliarder kr. Det bliver prisen for at opgradere el-systemet, så det kan klare at oplade de mange nye elbiler, som vil køre på de danske veje i 2030.

Tallene kommer fra en analyse udgivet af Dansk Energi i juli 2019.

Markant flere elbiler er en forudsætning for at mindske transportsektorens udslip af CO₂. Dermed er det også en nødvendighed i forhold til at nå regeringens målsætning om at mindske Danmarks samlede CO₂-udslip med 70 % i 2030 i forhold til niveauet i 1990.

Problemet er bare, at elnettet ikke er rustet til at skulle oplade et meget stort antal elbiler oven i det øvrige forbrug. Konkret betyder det ifølge analysen, at elnetselskaberne skal udskifte 16.000 km elkabler. Samtidig skal der ekstra hardware ind i 25.000 skabe, og der skal i gennemsnit sættes 250 lade-standere til elbiler op hver dag frem mod 2030.

”Det er med andre ord en meget stor samfundsopgave, der ligger foran os. Der er behov for, at politikerne hurtigst muligt lægger sig fast på, hvor mange elbiler, nettet skal kunne servicere, og hvor hurtigt udbygningen skal ske. Det er væsentligt billigere, hvis elnetselskaberne får mulighed for at tilrettelægge opgraderingen over en række år, og i takt med at der alligevel reinvesteres i nettet frem for hvis man en dag skal grave alting op på én gang,” forklarer CTO Jørgen S. Christensen, Dansk Energi.

Udbygningen kommer samtidig til at udfordre forsyningssektorloven, understreger han:

”Den nuværende regulering giver ikke mulighed for, at elnetselskaberne kan investere i den størrelsesorden, der er brug for. Når selskaberne skal investere, er de nødt til at hente pengene hos kunderne. Men det er politikerne, der bestemmer, hvor mange penge selskaberne må hente. Derfor er der behov for en politisk plan for, hvordan udbygningen af elnettet skal ske. Jo hurtigere den politiske plan kendes, jo billigere kan man lave udbygningen af elnettet.”

Case: Lithium Balance

Høj fleksibilitet med smart opladning af batterier

Vi kender især genopladelige lithium-batterier fra bærbare computere og smartphones. Ifølge danske Lithium Balance vil de også få en markant rolle i verdens bæredygtige energisystemer.

Takket være deres kombination af meget høj energitæthed og lav vægt dominerer de såkaldte lithium-ion batterier allerede markedet for anvendelser i lap-tops, smartphones og andre bærbare enheder.

Næste skridt bliver elbiler, hvor de samme kvaliteter er efterspurgt. Og kigger man blot lidt længere ud i fremtiden, kommer lithium-batterierne til at bidrage med en stor del af den fleksibilitet, som energisystemer baseret på vedvarende energi afhænger af. Det mener man hos den danske virksomhed Lithium Balance.

Virksomheden udvikler og producerer systemer, der styrer opladningen af lithium-ion batterier. I fagsproget Battery Management Systems (BMS). Det er nemlig muligt at øge effektiviteten af batterierne ved at styre opladningen rigtigt. Således lykkedes det i 2006 for virksomheden at gøre en el-scooter i stand til at tilbagelægge 157 km på en enkelt opladning. Det var markant længere end den daværende normal på 40 km med en standard batteriløsning. Siden har virksomheden udvidet anvendelsesområdet til elbiler, busser, motorcykler, lastbiler, elektriske kørestole samt procesudstyr i industrien. Lidt paradoksalt er salget i hjemlandet imidlertid beskedent.

"Lithium-batterierne gør sig især gældende ude i verden. I Danmark har vi historisk ikke haft det samme behov, fordi vi længe har haft et velfungerende elnet med høj forsyningssikkerhed. Men i mange lande kan man gå direkte til et energisystem, der baserer sig meget på batterier. Lidt på samme måde som eksempelvis Kenya sprang fastnet-telefonerne over og gik direkte til et system for mobil-telefoni," siger adm. direktør Lars Barkler, Lithium Balance.

På grund af de naturlige udsving i produktionen af vindkraft, solenergi mv. vil der være god brug for batterier i fremtidens bæredygtige energisystem – også i Danmark.

"Problemet er, at fokus for reguleringen i Danmark fortsat er, at vi skal spare på energien – ikke, at vi skal bruge den vedvarende energi, når den er der. Derfor mangler vi en brændende platform for at udvikle batteriløsninger. Jeg kan godt være bange for, at vi sidder fast i den tankegang. Dermed kan vi blive en dinosaur og komme til at uddø," siger Lars Barkler og understreger, at udtalelsen ikke skal misforstås som manglende respekt for det danske el-system:

"Vi har det bedste energisystem i verden med den højeste grad af forsyningssikkerhed og den højeste andel af vindenergi. Og nu bliver vi nødt til at disrupte det!"

www.lithiumbalance.com

Din Forsyning:

Tarifferne bør belønne systemintegration

Director of operations Claus A. Nielsen, Din Forsyning

Der er behov for regionale energisystemer.

"I dag udvikler de forskellige sektorer hver deres energisystem. Dermed bliver reguleringen ikke optimal, og vi får flaskehalse."

Din Forsyning er et multiforsyningsselskab i Varde Kommune og Esbjerg Kommune. Såvel drikkevand som spildevandsbehandling samt produktion og distribution af fjernvarme hører under selskabet. I Varde Kommune drives desuden fem genbrugspladser samt indsamling af affald fra husstandene.

Elektrificering vil ikke være nok til at reducere udslip-pene af CO₂, understreger Claus A. Nielsen:

"Der er lidt for meget tro på elektrificering alene. Fjernvarme skal fortsat være en del af løsningen. Men vi skal væk fra kraftvarme og hen til integration af energisystemer. Vi skal belønne et skift fra kraftvarmeproduktion til kraftvarmeintegration. Lige nu er selvforståelsen, at man er et kraftvarmeverk. Reelt er man et bindeled, der medvirker til at sikre balance."

Økonomi kan være et redskab til at ændre tingene:

"Tarifferne skal være de rigtige, så man belønner fleksibel og dermed intelligent systemintegration," siger Claus A. Nielsen og understreger, at også gas og affaldsforbrænding fortsat bør have deres plads:

"Gas bør fortsat indgå i energisystemet, fordi det er velegnet til lagring og som energibærer over store afstande, eksempelvis i et europæisk energisystem. Gas kan også anvendes i den tunge transport. Med hensyn til affaldsforbrænding vil det egne sig til at fylde hullerne ud i forsyningen. Dog er der behov for øget sikkerhed om business casen for affald."

Sidst men ikke mindst har Claus A. Nielsen en række konkrete ønsker til Smarte Energisystemer:

"Der mangler standarder for data og systemarkitektur, og der mangler en digital model for det fysiske netværk. Desuden er der behov for at kunne kvantificere business casen for multiforsyning og Smarte Energisystemer i et beslutningsstøtteværktøj."

Desuden et hjertesuk:

"Vi har været tilbageholdende med at tage risici og investere, fordi vi ikke vil skydes i skoene, at vi er dårlige til at passe på forbrugernes penge. Der er behov for en ny regulering, så vi ikke bliver sat op mod hinanden og optimerer for snævert inden for hver enkelt sektor."

TREFOR:

Sæt digitaliseringen fri!

Direktør for infrastruktur Charles Nielsen, TREFOR

Inden for Smarte Energisystemer er der behov for flere test og demonstrationsprojekter, der har rammebetingelser som fokus.

”Lokalt vil vi gerne integrere på tværs af el, vand og varme, særligt integrere fjernvarme og spildevand. Men bestemmelser i den regionale varmeplan gør det stort set umuligt – og i hvert fald økonomisk uinteressant. Det er et eksempel på, hvordan uheldige rammebetingelser og forvaltning af disse stiller sig i vejen for gode løsninger. Der er for længe blevet gennemført test- og demonstrationsprojekter, hvor fokus har været teknologier, uden at der har været tænkt på rammebetingelser.”

TREFOR Infrastruktur er Trekantsområdets forsyningselskab. Via de tre sidestillede selskaber TREFOR Vand, TREFOR Varme og TREFOR El-net forsynes borgerne i selskabets område med vand, varme og el.

Selskabet var tidligt ude med fjernaflæsning af data hos forbrugerne. I dag sker aflæsningerne en gang i døgnet.

”Kvaliteten og ensartetheden af vore data er høj,” siger Charles Nielsen, men tilføjer: ”På landsplan er der stadigvæk rum for forbedring mht. kvaliteten af data. Det skyldes blandt andet reguleringen af forsyningssektoren, hvor der er behov for bedre betingelser for investering. Den nuværende regulering har fokus på effektivitet uden tanke for udvikling og investeringer i nye og anderledes løsninger – herunder digitale løsninger”.

”I det hele taget er der behov for at sætte digitaliseringen fri. Det kan ske ved at investere økonomisk og politisk i at skabe sammenhæng mellem decentral og central energiinfrastruktur, så de decentrale løsninger også fremmer udvikling og drift af de samlede energisystem. En vigtig forudsætning for, at det kan ske, er, at vi går fra et reguleringsregime, som er bagudskuende og benchmark-baseret til et, der er fremadskuende og aftalebaseret.”

På den baggrund ønsker Charles Nielsen højere tempo i digitaliseringen af energisektoren: ”Digitalisering er nødvendig af hensyn til at sikre balance, når stadig mere af energiforsyningen udgøres af vedvarende energi. Samtidig er digitalisering forudsætningen for et effektivt asset management i det enkelte selskab, for derigennem betids at begrunde udskiftning eller rettidig og rigtigt placeret forstærkning i infrastrukturen.

Foreningen Biogasbranchen:

Gassen er det forsømte barn

Adm. direktør Frank Rosager, Foreningen Biogasbranchen.

Gas, og især biogas, har en vigtig rolle at spille i fremtidens energisystem.

”Desværre er det gået ud over gassektoren – også biogassen – at de fossile energikilder er kommet i bad standing. Gassen er blevet det forsømte barn i diskussionen om fremtidens Smarte Energisystemer.”

Foreningen Biogasbranchen repræsenterer alle aktører med interesse i biogas, herunder producenter af biogas, leverandører af anlæg og udstyr, rådgivere, leverandører af biomasse, energi-, transport-, affalds- og landbrugssektoren, videns-institutioner mv.

”Biogas kan slå flere fluer med ét smæk. Biogas sikrer genanvendelse af næringsstofferne fra byernes organiske affald samtidig med, at den fossilfri biogas kan gøre byernes transport bæredygtig,” påpeger Frank Rosager og fortsætter:

”Især inden for bæredygtig tung transport halter Danmark gevaldigt efter nabolandene. De har fuld fart på omstillingen fra diesel til gas, og de opnår markante reduktioner i udslippene, selvom de i første omgang overvejende anvender naturgas. Den store gevinst kommer med omstillingen til biogas. Her står Danmark stærkt som det land, der har den største andel biogas i gassystemet. Derfor kan det undre, at omstillingen går så langsomt i Danmark. Det skyldes blandt andet, at Danmark som et af meget få EU-lande har en afgiftsstruktur, der gør det dyrere at anvende biogas end diesel.”

I det hele taget bliver potentialet i gas overset, mener Frank Rosager:

”Der er gode muligheder for at lagre gas. Vi har allerede lagrene. Desuden er kapacitetseffekten større end for el-systemet. Desuden satser mange lande i Europa på at erstatte kulkraft med gasturbiner. Endelig er biogas særligt velegnede til såkaldt power-to-gas, der omformer overskydende vindkraft til lagerbar metan-gas.”

De mange nye muligheder kalder på forskning.

”Blot for at nævne et par emner er det oplagt at forske mere i Power-to-Gas og i andre processer, der konverterer strøm til metan og omvendt. Endelig er der fortsat en række problemstillinger omkring udnyttelsen af biomasse til produktion af gas, som branchen gerne vil have mere forskning i. Men desværre er situationen, at universiteterne forsker uforholdsmæssigt lidt i gasteknologi på grund af, at fossile energikilder er i bad standing. Desuden er det et problem, at forsyningssektorloven vil tvinge selskaberne i branchen til at holde igen med deres investeringer blandt andet inden for forskning og udvikling.”

NCC:

Bygninger bør tænkes som en del af energisystemet

Direktør for strategi, forretningsudvikling og public affairs Martin Manthorpe, NCC

De materialer, som bygninger er konstrueret af, har alle en vis evne til at lagre varme. Det giver mulighed for, at man kan være fleksibel med, præcis hvornår der skal opvarmes. På den måde kan bygningerne give et vigtigt bidrag til at holde fremtidens Smarte Energisystemer i balance.

”Men før vi kan udnytte byggeriets potentiale for at spille sammen med energisystemet, er der nogle tankegange, som vi skal have på plads. Vi har altid tænkt, at et nyt byggeri først og fremmest skulle beskytte beboerne mod vind og vejr. Dernæst er der set på energiforsyning. Vi mangler en faglig drøftelse af, hvordan vi forholder os til, at bygninger i dag skal så meget mere.”

NCC er en af Nordeuropas førende virksomheder inden for byggeri og ejendomsudvikling med 17.800 medarbejdere (2017). Virksomheden lægger vægt på bæredygtigt byggeri. I den forbindelse er det naturligt at interessere sig for samspillet med energisektoren, mener Martin Manthorpe:

”Der tænkes for lidt på, hvordan bygninger kommer ind tidligt i udviklingen af energisystemet, både med hensyn til lagring af vedvarende energi og som forbruger af energi. En af årsagerne er, at der gælder forskellige rammebetingelser, eksempelvis for byggeri på kommunalt niveau og for energi på nationalt niveau. Desuden er det uklart, hvem der skal løfte problemstillingen. Dette er problemstillinger, vi aktivt arbejder på at rejse politisk!”

Med andre ord er der behov for en fødselshjælper.

”Byggebranchen ser ikke på det, før der kommer politisk fokus. Et forslag kunne være, at alle bygninger, der tages i drift, skal levere en ”bygningens selvangivelse”, der redegør for alt forbrug - også den indlejede energi. Vi er selv igang med at udarbejde det første komplette klimaregnskab for en bygning! Den dag, der kommer penge på bordet, rykker branchen.”

Desuden mangler man et grundlag at agere på, understreger Martin Manthorpe: ”Vi har faktisk ikke de nødvendige data for, hvor stor kapacitet for varme-lagring, der gemmer sig i bygningerne, og hvor meget, man kan vinde ved at forskyde energiforbruget. Og når vi har lært at indsamle data, skal vi lære at bruge data og omsætte data til forretning. Der er lang vej endnu. Når man tænker dataopsamling, tænker man i dag i siloer, hvor energidata for eksempel skal komme fra energiselskaber. Men data skal netop tænkes på tværs. Branchen bliver de kommende år kastet ind i denne problemstilling med fremkomsten af IoT -internettet i alting - hvilket er et område, vi har forsket i de seneste fire år. Vi skal alle finde vores plads i den regn af data, der vil ramme os. Og vi skal finde det bytteforhold, der giver os adgang til de relevante dele af datamængden, der kan bruges til udvikling.”

Kamstrup:

Fjernvarmen kan få en hovedrolle

Head of product management solutions Steen Schelle Jensen, Kamstrup

Fjernvarme og energieffektivisering bliver to vigtige brikker, når fremtidens energisystem skal baseres fuldt ud på vedvarende energi.

”Der er for det meste lige lovlig meget fokus på elektrificering i forbindelse med Smarte Energisystemer. For eksempel mangler der noget om, hvordan vi fremadrettet skal opvarme bygninger som udgør 40-50% af EU's samlede energiforbrug. Nøglen bliver at anvende overskudsvarme og vedvarende el i fjernvarmen”.

Kamstrup udvikler og producerer målere og andet udstyr, der blandt andet benyttes inden for varme-, el-, køle- og vandforsyning. Steen Schelle Jensen henviser til projektet Heat Roadmap Europe, som Aalborg Universitet og en række andre akademiske partnere står bag: ”Kortlægningen viser, at der er mere overskudsvarme i Europa, end vi bruger, samtidig med, at vi importerer fossil energi og brænder det af til opvarmning!”

Danmark har længe været pioner inden for fjernvarme, som i dag tegner sig for 60-70 % af den samlede varmforsyning i Danmark. Til sammenligning er andelen for hele EU blot 10-15 %.

”Med andre ord er der et stort potentiale i Europa. Blandt andet bliver flere opmærksomme på, at fjernvarme også kan anvendes til at øge fleksibiliteten i energisystemet. En af mulighederne er at anvende overskydende el i varmepumper, der leverer varme til fjernvarmenettet. Heldigvis er der en positiv udvikling i gang. Eksempelvis udbygger Holland kraftigt på deres fjernvarmenet, mens der også er positive toner i Tyskland.”

Som pionerland er det oplagt, at der åbner sig eksportmuligheder for Danmark, men man må ikke tage tingene for givet, understreger Steen Schelle Jensen: ”For eksempel mangler vi test- og demonstrationsprojekter, som kan dokumentere skalerbarheden af løsningerne inden for fjernvarme. Og i det hele taget mangler der noget hardcore fokus på teknologien med henblik på at udvikle den næste generation af fjernvarme og gøre teknologien endnu mere konkurrencedygtig end de fossile brændsler.”

Digitale løsninger er i den forbindelse helt centrale: ”Der er behov for at udvikle en digital tvilling, så man løbende kan sikre optimal balance mellem temperatur, tryk og flow. Det bliver yderligere vigtigt fremover, når vi skal integrere endnu mere vedvarende energi i systemet og stadig holde produktion og forbrug i balance.”

”Digitalisering er samtidig forudsætningen for asset management, hvor man identificerer varmetab og opdager risiko for lækager og nedbrud, inden de faktisk optræder. Denne type løsninger vil bidrage til at gøre fjernvarme yderligere attraktiv, fordi man forebygger situationer, hvor forbrugerne står uden varme.”

Vestas:

Digitalisering kan mere end at optimere

Cluster lead energy integration, ideation & partnering, Mads Blumensaat, Vestas A/S.

Digitalisering kan spille en afgørende rolle for en ny generation af teknologier til kontrol, aggregering og realtids-systemer i kontrolrum.

"Vi er især optaget af de områder, hvor digitalisering ikke blot optimerer de nuværende systemer, men disrupter dem."

Vestas designer, producerer, installerer og service-rer vindmøller over hele kloden. Med 105 gigawatt installeret kapacitet fordelt på 80 lande har Vestas installeret mere vindkraft end nogen anden virksomhed. Af denne samlede kapacitet står virksomheden selv for vedligehold af 86 gigawatt. I den forbindelse udnytter Vestas en lang række digitale løsninger til at indsamle data og fortolke dem med henblik på at optimere såvel produktionen som holdbarheden af møllerne og det samlede system.

"Heldigvis er der stor fokus på at nedbringe udslip-pene af CO₂ fra verdens energiproduktion. Det må være en tilstrækkelig stærk gamechanger, der kan motivere til at indføre digitale løsninger, der gør vindkraft yderligere attraktiv," siger Mads Blumensaat og tilføjer, at der også er barrierer: "Det er ofte uklart, hvem der vil høste værdien af digitalisering. Markedet er kendetegnet ved mange aktører og en meget distribueret og fragmenteret datastruktur. Tilmed er en del data underlagt monopoler."

Et yderligere argument i forbindelse med digitalisering er, at den kan være et middel til at sikre et bedre samspil mellem de forskellige energiformer.

"Vi kunne godt ønske os, at det blev bedre dokumenteret, hvor stort potentialet er ved at ændre energisystemet, hvor man opnår bedre sammenspil og udnyttelse mellem de forskellige energiformer. Samtidig er det en udfordring for industrien, at vi ikke ved, hvordan de andre energiformer kommer til at spille ind i systemet. Det gør det vanskeligt at styre ud fra hensyn om balance."

"I den forbindelse er der behov for udvikling af et regime af dynamiske afgifter og tariffer. I dag er der ligefrem regulatoriske afgifter, som blokerer for ønskelige udviklinger. For eksempel giver det højere afgifter at producere varme på elektricitet frem for at benytte biomasse til varme."

Ørsted:

Digitalisering kræver strategiske satsninger

Jan Hvidberg Lead Analyst Analytics & Optimisation Bioenergy & Thermal Power

At udvikle fremtidens fleksible og intelligente energisystem handler om mere end teknologi.

”Energisektoren er nødt til at ændre sin opfattelse af IT. I dag tænker man på IT, som et redskab, der understøtter driften. Det er en udfordring at skabe en ny kultur for udvikling ved hjælp af digitalisering og data.”

Det er Ørstedes mål at nå en installeret kapacitet på mere end 30 GW grøn elproduktion i 2030. Det svarer til 50 millioner menneskers forbrug. Kunstig intelligens (AI) er allerede en del af hverdagen i Ørsted. For eksempel har virksomheden applikationer, der tidligt afslører fejl på møllernes vinger, overvåger elkabel-nettet, samt understøtter den overordnede kontrol med el-systemet. Imidlertid stiller det nye krav, når man ikke blot ønsker at optimere inden for et enkelt selskabs aktiviteter, men på tværs af flere selskaber og endda flere energiformer i et sammenhængende energisystem.

”Usikkerheden om kombinationer af udfordringer, teknologier og rammebetingelser afspejler, at der er et opbrud i gang. Efterspørgslen skifter karakter. Det skaber behov for forecasting, fordi markedet gives fri. På trods af, at der er kommet høje krav fra EU om dokumentation fra nye aktører, ser vi alligevel, at der kommer mange flere aktører,” siger Jan Hvidberg.

Forecasting kan for eksempel bestå i indsamling af data for forbrug og produktion, så man er i stand til at forudsige udviklingen over de næste 24 timer. Gode forudsigelser med så relativt lang tidshorisont vil forbedre driftsøkonomien markant samtidig med, at mulighederne for at optimere, så man samlet set udleder mindst muligt CO₂, bliver væsentligt bedre.

En mulig forhindring kan være hensyn til forbrugernes privatliv, som fører til begrænsninger på, hvilke data om forbrug, som selskaberne må indsamle.

”I den forbindelse er det utroligt vigtigt at finde holdbare løsninger omkring cybersikkerhed og privacy. I det hele taget er det ikke sandsynligt, at enkelte virksomheder kan finde de rigtige løsninger. I Ørsted bakker vi op om den ide, at man i sektoren må gå sammen om meget større og fælles strategiske satsninger.”

Appendiks 5

Arbejds- og redaktionsgruppe:

Lektor Toke Rammer Nielsen, DTU Byg

Lektor Ekkart Kindler, professor Henrik Madsen, lektor Lasse Engbo Christiansen og Head of Innovation og Project Manager for DTU High Tech Summit Mark Bernhard Riis, DTU Compute

COO for PowerLabDK Frida Frost, seniorforsker Henrik W. Bindner, professor Jacob Østergaard, professor Pierre Pinson, DTU Elektro

Sektionsleder Rasmus Bjørk og professor Peter Vang Hendriksen, DTU Energi

Professor Lars Dittmann, DTU Fotonik

Lektor Peter Christian Kjærgaard Vesborg, DTU Fysik

Professor Henrik Klinge Jakobsen og lektor Klaus Skytte, DTU Management

Professor Brian Elmegaard, DTU Mekanik

Professor Poul Ejnar Sørensen, DTU Vind

Seniorkonsulent Gordon McKenzie, DTU UNEP

Fuldmægtig Lisa Maria Hansen, DTU APR

Senior forretningsudvikler Jørgen Kejlberg, chefkonsulent Lone Falsig Hansen, chefkonsulent Patrick Driscoll og specialkonsulent Ulla Høeberg Jørgensen, DTU AFRI

Professor Poul Erik Morthorst, DTU Management (leadprofessor)

Chefkonsulent Mads H. Odgaard, DTU AFRI (projektleder)

Styregruppe:

Institutedirektør Niels-Jørgen Aagaard, DTU Byg

Institutedirektør Per B. Brockhoff, DTU Compute

Institutedirektør Kristian Stubkjær, DTU Elektro

Institutedirektør Søren Linderøth, DTU Energi

Institutedirektør Lars Ulrik Aaen-Andersen, DTU Fotonik

Institutedirektør Jane Hvolbæk Nielsen, DTU Fysik

Institutedirektør Mette Wier, DTU Management

Institutedirektør Hans Nørgaard Hansen, DTU Mekanik

Institutedirektør Peter Hauge Madsen, DTU Vind

Direktør John M. Christensen, UNEP, DTU Management

Direktør Michael H. Nielsen, Dansk Byggeri

Forsknings- og teknologidirektør Jørgen S. Christensen, Dansk Energi

Vicedirektør Kim Behnke, Dansk Fjernvarme

Vicedirektør Jan K. Jensen, Dansk Gasteknisk Center a/s

Branchedirektør Troels Ranis, DI Energi

Chef for energipolitik og bæredygtighed Majbritt Juhl, FRI

Koncerndirektør for Innovation og Entreprenørskab Marianne Thellersen, DTU (formand for styregruppen)

Interviewede personer i virksomheder:

Automationsingeniør Morten Herget Christensen, Balslev
 Chief Project Manager Reto Michael Hummelshøj, District Heating, COWI
 Manager Jan Eric Thorsen, DH Application Centre at Danfoss Drives A/S
 og Vice President Atli Benonysson, Danfoss A/S
 Head of Product Management Solutions - Heat/Cooling Division Steen Schelle Jensen, Kamstrup A/S
 Export direktør Niels Heidtmann, Komproment
 CEO Lars Barkler, Lithium Balance, Lithium Balance
 CEO Brian Gottorp Jeppesen, Mjølner Informatics
 Direktør for strategi mv. Martin Manthorpe, NCC
 Director Keld Wesenberg Lyngsø og Lead Analyst Jan Hvidberg, ORSTED
 Senior Market Manager Anders Dyrelund, Ramboll
 Teknisk chef Finn Passov, Spæcom
 Sales Director Peter Weinreich-Jensen, Siemens
 Group Senior Vice President Flemming Bent Thomsen, Systematic
 Cluster Lead Energy Integration, Ideation & Partnering Mads Blumensaat, Vestas A/S
 CEO Martin Speiermann, WattsUp Power A/S

Interviewede personer i forsyningsselskaber og offentlige myndigheder/institutioner:

Forsyningschef Jesper Møller Larsen, Aalborg Forsyning
 Fagleder IT Teknisk Adam Brun, AffaldVarme Aarhus
 Adm. dir. Frank Rosager, Dansk Biogasforening
 Ingeniør Niels Andersen, Cerius
 Manuel Sánchez Jiménez, PhD Team Leader for Smart Grids, DG Energy
 Director of Operations Claus A. Nielsen, Din forsyning
 Jeppe Danø, Områdeleder, Johnny Holst, International chefrådgiver
 og Stine Grenaa Jensen, Energinet, Gas TSO
 Adm. dir. Søren Dupont Kristensen, Energinet, Elsystem
 Laurent Schmitt, Secretary-General, Norela Constantinescu,
 Senior Advisor Research & Innovation - Team Lead, ENTSO-E
 Forsyningschef Jakob Storm Rasmussen, Fjernvarme Fyn
 Adm. dir. Søren Hylleberg Sørensen, HMN Gasnet A/S
 Barbara Jinks, Director Government Relations, GIE
 Laszlo Varro, Chief Economist, IEA
 Adm. dir. Anders Millgaard, Modstrøm A/S
 Adm. dir. Ole Hvelplund, NatureEnergy A/S
 Lead Strategy Consultant Poul Brath, Radiusnet
 Projektleder Eva Sass Lauritsen, SEAS-NVE
 Chefkonsulent Jens Holger Helbo Hansen, Skatteministeriet
 Andrés Pinto Bello Gómez, Policy Analyst, SmartEnergyEU
 Direktør for infrastruktur Charles Nielsen, TREFOR

Disclaimer: Personer i virksomheder, på universiteter og offentlige institutioner og myndigheder opstillet ovenfor er interviewet, men kan ikke nødvendigvis tages til indtægt for indholdet af rapporten. Henvendelser vedr. rapporten kan rettes til chefkonsulent Mads H. Odgaard, maod@dtu.dk.

