



Energikoncept 2030 – Sammenfatning

En analyse af koncepter og udviklingsveje, der kan understøtte
et konkurrencedygtigt og robust VE-baseret energisystem

Indhold

1 Resumé.....	3
1.1 Baggrund – Danmark i et vinddomineret energisystem.....	3
1.2 Om analyserne og resultaterne.....	4
2. Rammevilkår – politisk og markeds-mæssigt	7
2.1 Den politiske vision for Danmarks energiforsyning	7
2.2 De markeds-mæssige rammebetingelser	7
2.3 Systemdesign der styrker forsynings-sikkerhed med energitjenester	8
2.4 Danmarks styrkepositioner til at realisere den politiske vision	9
2.4.1 Vindkraft som konkurrencedygtig energiressource.....	9
2.4.2 Fleksibel produktion af VE-brændstoffer fra bio, affald og vind	10
3 Konceptløsninger til et effektivt vedvarende VE-energisystem	11
3.1 Generelt.....	11
3.2 Et muligt omstillingsforløb under hensyn til samfundsøkonomi.....	11
3.3 Optimering af systemets energieffektivitet	12
3.4 Europæiske 10-års vind-/soltidsserier vurderes i systemdesign.....	12
3.5 Nye principper for drift af elnettet i samspil med det øvrige energisystem.....	13
3.6 Systemydelser fra fleksibelt elforbrug.....	14
3.7 Integration mellem nye lokale VE-gasnet og det overordnede gasnet	15
3.8 Perspektiv i øget højtemperatur integration i energisystemet	15
3.8.1 Højtemperatur varmepumper til industri/service	15
3.8.2 Integration af højtemperatur varme i Power-to-gas.....	15
3.9 Omkostningseffektiv styring af energisystem til nye koncepter	15
3.10 Robusthed over for ændringer i omgivelsesbetingelser	16
4. Fra forskning og udvikling til implementering.....	17

Rapporten kan downloades
på: www.energinet.dk

Energinet.dk
Tonne Kjærsvvej 65
7000 Fredericia
Tlf. 70 10 22 44

info@energinet.dk
www.energinet.dk

Maj 2015



1. Resumé

1.1 Baggrund – Danmark i en region med store vindkraftpotentialer

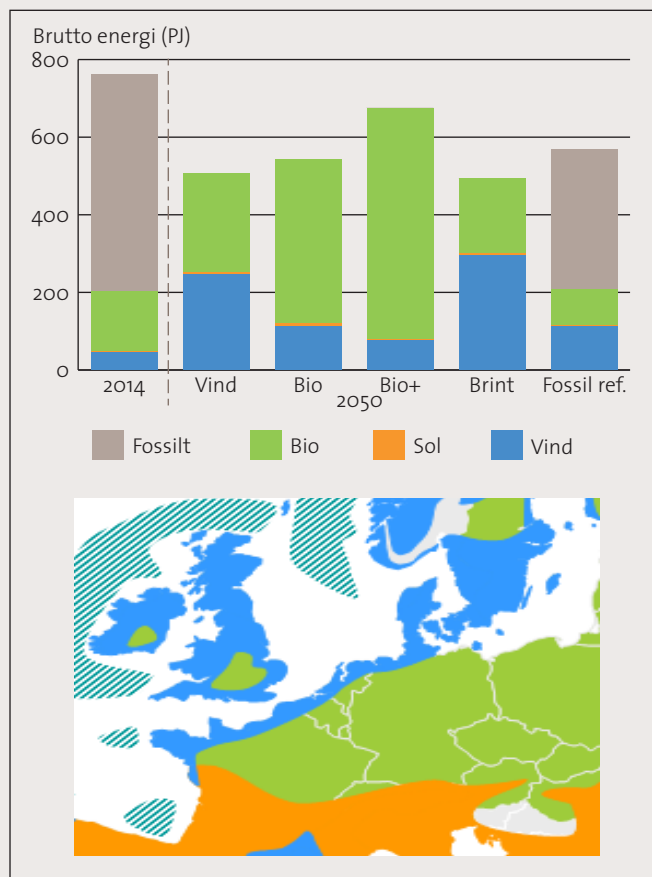
Dette notat er en sammenfatning af rapporten ”Energikoncept 2030”¹, der præsenterer Energinet.dk’s analyse af systemløsninger i et energisystem med store mængder vindkraft.

Formålet er at vurdere, om nye systemmæssige tiltag kan gøre et vindkraftdomineret energisystem mere omkostningseffektivt og konkurrencedygtigt med en fossilbaseret reference. Arbejdet tager afsæt i energiforligningsanalyserne, som er udarbejdet af Energistyrelsen med input fra blandt andre Energinet.dk². Her er analyseret fire fremtidsscenarier for Danmark med forskellige mængder vindkraft og biomasse/affald og et fossilt reference-scenarie. I alle scenarier forventes markant øgede mængder vindkraft i forhold til i dag jf. Figur 1. Også i det fossile reference-scenarie, hvor hovedfokus er lavest mulige omkostninger, når der også bruges fossile brændsler. I vindscenariet er der udbygget med en mængde vindkraft, således at vind og sol, sammen med en mængde biomasse/affald svarende til det nationale potentiale, kan forsyne Danmark. Dette scenarie bliver i energiforligningsanalyserne vurderet til at være den retning, som har den højeste brændselsforsyningsikkerhed.

Danmark er med sin placering i Nordsøregionen omgivet af flere lande, der har adgang til store vindressourcer.

¹ Energikoncept 2030-rapporten er tilgængelig på www.energinet.dk/energianaalyse

² Energiforligningsanalyserne udgør en samling af rapporter fra Energistyrelsen, maj 2014. Herunder samlede scenarier for energisystemet og rapporter med analyser af el, gas, varme og biomasse. Ifølge link: <http://www.ens.dk/politik/dansk-klima-energi-politik/regeringens-klima-energi-politik/energi-aftalens-analyser>



Figur 1: Øverst, brutto energiforbrug i Energistyrelsens scenarier for 2050. Nederst: VE-styrkepositioner i EU, kilde: EU e-Highway, 2014.

En del af disse ressourcer er allerede i dag ved at blive realiseret. Nordtyskland forventer inden for 10 år at nå op på ca. 34 GW, hvor Danmark til sammenligning i dag har knap 5 GW og i 2025 forventes at have ca. 7 GW.

Uanset om der er dansk eller europæisk investering i vindkraft i dette område, vil det påvirke elmarkedet i og omkring Danmark. En tilpasning af det danske energisystem til et vindkraft-domineret elmarked vil derfor være hensigtsmæssig uafhængig af udbygningsniveauet af dansk vindkraft. Energiforligningsanalyserne vurderer, at vindscenariet i 2050 er ca. 8 pct. dyrere end en fossil reference. Isoleret set bliver vindkraft – specielt landvind – vurderet til at være blandt de mest omkostningseffektive energiressourcer til elproduktion. Men når andelen af vindkraft i energisystemet stiger, kan integrationen af vindkraften gøre de samlede systemomkostninger dyrere. Særligt er omkostninger til elkapacitet som backup for vindkraften, forstærkning af elinfrastruktur og balancering af elsystemet medvirkende til at gøre vindscenariet med meget store mængder vindkraft dyrere end et fossilt referencescenarie. Systemtiltag, der kan reducere disse omkostninger, er derfor centrale.

Vindscenariet (og brintscenariet) er karakteriseret ved at have et meget lavt forbrug af brændselsressourcer og en langt mere fluktuerende forsyning af primær energi. Dette er en ny og anderledes måde at drive et samlet energisystem på i forhold til både et fossilt- og et biomassebaseret energisystem, som begge er relativt brændselstunge. Jo mere omkostningseffektivt de vedvarende, fluktuerende energiressourcer kan integre-

res i et samlet forsyningssikkert energisystem, jo billigere bliver de vedvarende, brændselslette energiscenarier. Energinet.dk vurderer, at der stadig kan realiseres mange lærings- og effektiviseringsgevinster i denne type scenarie.

1.2 Om analyserne og resultaterne

Der er analyseret et omstillingsforløb, hvor el og varme er fossilfri i 2035. Derudover er der analyseret en række alternative forløb. Herunder et forløb, hvor fossil olie udfases af energisystemet frem mod 2035. I dette forløb anvendes fortsat en hvis mængde naturgas til spidslast elproduktion. Der er i alle forløb lagt vægt på at opnå konkurrencedygtig forsyning med energitjenester, set i forhold til en fossil reference

Samlet set vurderer Energinet.dk, at en række systemmæssige tiltag, som nærmere uddybes i rapporten, kan gøre vindscenariet mere omkostningseffektivt, således at det som helhed langsigtet er konkurrencedygtigt med en fossil reference. De beskrevne tiltag kan i særlig grad reducere omkostninger i et scenarie med store mængder fluktuerende el produceret i eller omkring Danmark. Det vurderes desuden, at indsatserne også vil reducere omkostningerne (om end i mindre grad), hvis Danmark vælger en retning med en mere begrænset udbygning af vindkraft og i stedet anvender større mængder af importeret biomasse eller fastholder brugen af en mindre mængde fossile brændsler. Der er således som helhed tale om ”no regrets” indsatser, som gør Danmark klar til et muligt senere valg af vindscenariet og klar til en international udvikling med store mængder vindkraft i regionen. Indsatsområderne er kort sammenfattet.



Fokus på tiltag der reducerer "risikotillæg" for energitjenester

Ved et konkurrencedygtigt energisystem baseret på vedvarende energi forstås her, at energisystemet kan levere energitjenester til en omkostning, som er konkurrencedygtig med en fossil reference. Det vil sige, omkostningen for slutbrugeren af energitjenesteydelsen (opvarmning, lys, transport, køling, procesvarme osv.) indgår i en mere overordnet vurdering af "systemets" forsynings sikkerhed³.

Hvis systemet gøres mere robust over for fluktuerende ressourcer, bliver omkostninger til "risikofordækning" mindre, og bidrager således til samlet set billigere energitjenesteydelser. Tiltag, der styrker energisystemets robusthed, introduceres derfor i analysen. Samspillet mellem energisystemerne el, varme, gas og flydende brændstoffer giver en øget fleksibilitet, og valg af løsninger påvirker i høj grad robustheden over for markedets fluktuerende ressourcepriser.

Energieffektiv systemintegration reducerer behov for den dyreste havvind

Rapporten peger på system-effektivitetstiltag, der potentielt ville kunne reducere det samlede behov for vindenergi med 15-25 pct. i forhold til et traditionelt vindscenarie, uden at bruge yderligere biomasse. Den reduktion af vindkraft kan komme fra de sidste (og dyreste) af havmølleparkerne. Desuden peger

rapporten på, at der kunne være et større potentiale for billig landvind end energiscenariernes grænse ved 3.500 MW, hvilket kan reducere behovet for havvind yderligere. Samlet set bidrager energieffektiviseringer og bedre udnyttelse af vindressourcerne i Danmark til færre nødvendige investeringer i relativt dyr offshore vind.

Mindre backup-kapacitet ved samarbejde på tværs af landegrænser og energisystemer

Infrastruktur og markedsintegration over længere afstande kan udnytte, at vinden altid blæser et eller andet sted – og at spidslastforbruget sjældent forekommer samtidigt overalt. Der er gennemført en relativt omfattende analyse af 10 års europæiske vind-/soltidsserier samt forbrugstidsserier. Denne viden er sammenholdt med scenarieanalyser for både Danmark og vores nabolande i 2035/2050-scenariene. Der er analyseret forsynings sikkerhed i kortere og længere perioder med lav produktion af vind/sol, både i Danmark og i Nordeuropa. Analysen peger på en kombination af fleksibelt elforbrug, der især kan levere spidslast over minutter og timer, og international markedsintegration over afstande på mere end 500 km som kan levere over flere dage. Disse løsninger har potentiale til at reducere behovet for at betale for backup-kapacitet (termiske kraftværker) med 25-35 pct. i forhold til en klassisk tilgang med spidslastkapacitet.

Fleksibelt forbrug kan give en mere effektiv udnyttelse af elnettet

I eltransmissionssystemet anvendes i dag netreserve (N-1) som design- og driftskriterie. Det vil sige, at der skal være reserveka-

³ Den overordnede forsynings sikkerhed defineres her som "Sandsynligheden for at der er energitjenester til rådighed til konkurrencedygtige priser, når de efterspørges af forbrugeren – uden at Danmark bringes i et uheldigt afhængighedsforhold til andre lande".
"Redegørelse om forsynings sikkerheden i Danmark", Energistyrelsen, 2010.



pacitet i nettet, så der kan håndteres udfald af største enhed (fx en transmissionsforbindelse eller en elproduktionsenhed). Der er analyseret et koncept med fokus på det lange sigt, hvor det fleksible elforbrug anvendes som netreserve, der kan kobles af, når behovet opstår. Nyt fleksibelt elforbrug vil således kunne forøge den samlede udnyttelsesgrad af nettet og dermed langsigtet reducere behov for investeringer i netkapacitet.

Billigere integration af grønne gasser ved samspil mellem forskellige typer gasnet

Energiforligsanalyserne peger på, at gassystemet og VE-gas⁴ kan være et vigtigt virkemiddel til at sikre forsyningssikkerhed og indpasning af energi fra biomasse og el fra vind og sol. Men det fremhæves også, at netop omkostningen til opgradering af VE-gas til naturgaskvalitet (SNG) kan være forholdsvis bekostelig. Der er derfor overordnet vurderet en række perspektiver for, hvordan lokale gasnet med VE-gas (biogas, syntesegas og H₂) og det overordnede gasnet i højere grad kan integreres, så der opnås forsyningssikkerhed, samtidig med at omkostningerne til opgradering begrænses. Der er behov for yderligere analyse af disse tiltag.

Højtemperatur spildvarme skal udnyttes effektivt

En række af de konverteringsprocesser, som potentielt bringes i spil i energisystemet de kommende årtier, afgiver eller kan optage varme ved høj temperatur. Det drejer sig om blandt andet Power-to-gas, termisk forgasning, brændstofdokatalyse. En an-

vendelse af denne højtemperatur varme direkte til lavtemperatur fjernvarme medfører et markant energispild, da energien i varmen kan udnyttes i et yderligere trin, før det bruges til fjernvarme. Der er analyseret på udnyttelse af denne højtemperatur varme til industriel procesvarme. Der er endvidere analyseret på systemløsninger, hvor Power-to-gas styres fleksibelt i forhold til udnyttelse af denne varme.

Forskning, udvikling, demonstration (FUD) og implementering

Hovedparten af de beskrevne tiltag har fokus på det lidt længere sigt og kræver en indsats med FUD for at kunne realiseres i energisystemet. Det er derfor en forudsætning, at tiltagene gradvist modnes over et antal år, inden de realiseres i større skala. Men en række teknologier er i dag "modne" til udrulning, særligt inden for el til varmeproduktion (varmepumper), og det er vigtigt, at rammerne understøtter realisering af disse teknologiers potentiale. Indretning af markedsrammerne, så disse teknologiers potentiale realiseres, er afgørende for en effektiv omstilling.

⁴ VE-gas er defineret som gas, der er produceret uden brug af fossile ressourcer, på samme måde som el fra vindkraft er produceret uden brug af fossile kilder.

2. Rammevilkår – politisk og markedsræssigt

2.1 Den politiske vision for Danmarks energiforsyning

Danmark har en politisk bredt forankret vision om at omstille energisystemet til vedvarende energi. Visionen har et langt sigt, hvor en fuldstændig omstilling forventes gennemfört frem mod 2050. I el- og varmesektoren forventes meget store andele af vedvarende energi allerede inden for de kommende 10-20 år. Det er et politisk ønske, at Danmark gennemfører omstillingen omkostningseffektivt, således at der fastholdes en energiforsyning, som tilstræber at være konkurrencedygtig med en fossil reference.

I denne rapport evalueres energisystemet både ud fra den samlede systemomkostning, og i hvilket omfang der kan sikres en konkurrencedygtig omkostning på de enkelte typer af energitjenester. Energijtenester defineres her som slutproduktet af energiydelsen, det vil sige opvarmning af bygninger, transport, belysning, procesvarme osv.

De centrale ønsker fra politisk prioritering er således:

- Konkurrencedygtig forsyning med energitjenester⁵.
- Høj forsyningssikkerhed i energisystemet og sikker adgang til energiressourcer.

Uafhængighed af fossile brændsler og omlægning til bæredygtige vedvarende energiressourcer.

Energistyrelsen har med input fra blandt andet Energinet.dk opstillet fire langsigtede scenarier for et vedvarende energibaseret energisystem og et fossilt referencescenarie. De fire scenarier har forskellige grader af biomasseforbrug, hvor vindsce- nariet er karakteriseret ved, at der anvendes en mængde bio- masse/bioaffald på niveau med de danske ressourcer (i alt ca. 260 PJ).

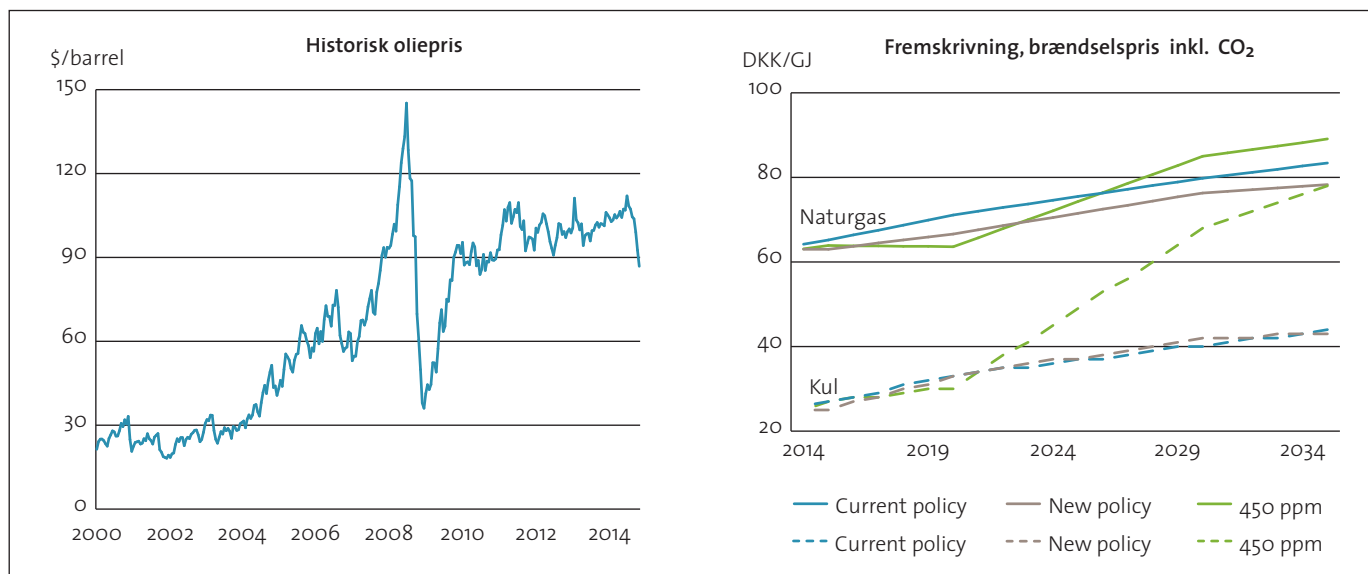
2.2 De markedsræssige rammebetingelser

Danmark er et lille land med en åben økonomi og en stærk energi-infrastruktur til omgivende lande. Den internationale udvikling er derfor en central forudsætning. I analysen er antaget IEA WEO "New policies" som centralt skøn for brændsels- og CO₂-priser.

Som det fremgår af Figur 2, er realiserede brændselspriser (hi- storisk) typisk relativt fluktuerende. Fremskrivningen skal ses som et centralt middelværdiskøn, og der kan forventes fluktua- tioner, også i årene fremover. En robusthed over for brændsels- pris-fluktuationer er således en væsentlig egenskab for det samlede energisystem. Tilsvarende er det centralt med robust- hed over for forskellige scenarier for den omstilling, som lande- ne omkring Danmark måtte vælge og dermed elprisen i Dan- marks nabo-områder.

Der er gennemfört følsomhedsanalyser med alternative brændsels- og CO₂-priser fra IEA New Policies og Current Polici- es og analyser af forskellige scenarier for landene omkring Danmark, jf. Figur 2.

⁵ Begrebet energitjenester defineres her som slutproduktet af det, som energien anvendes til, det vil sige opvarmning, transportarbejde, lys, køling, procesvarme osv.



Figur 2: Til venstre historiske oliepriser og til højre IEA's forventede brændselspriser (IEA WEO-scenarier).

2.3 Systemdesign der styrker forsyningssikkerhed med energitjenester

I takt med at el udgør en relativt større andel af energiforsyningen, bliver en helhedsorienteret analyse af forsyningssikkerheden af stigende betydning. Den overordnede forsyningssikkerhed defineres i denne sammenhæng som:

*"Sandsynligheden for at der er **energitjenester** til rådighed til **konkurrencedygtige** priser, når de efterspørges af forbrugeren – uden at Danmark bringes i et uhensigtsmæssigt afhængighedsforhold til andre lande".⁶*

Som en del af forsyningssikkerhedsberegningen indgår her systemets evne til at udvise robusthed over for variationer i vind/sol, brændsels- og CO₂-priser, udlandets elpriser, ny teknologi, nye behov for nye brændstoftyper til transport osv., jf. Figur 3.

Ved et traditionelt (fossiltbaseret) energisystem vil ændringer i ressourceprisen slå relativt direkte igennem på omkostningen for energitjenester.

Det vil typisk være muligt at risikoafdække denne usikkerhed ved at prissikre energiresourcen for en længere periode. Den prissikrede omkostning til energitjenesten vil derfor (forenklet) være forventet omkostning på energitjenesten plus tillæg for prissikring (risikoafdækning).

I analysen introduceres faktorer (β -faktorer), der angiver, i hvilket omfang en ændring i ressourceprisen på inputsiden af

energisystemet (jf. Figur 3) påvirker omkostningen på energitjenesten på outputsiden (kovarians).

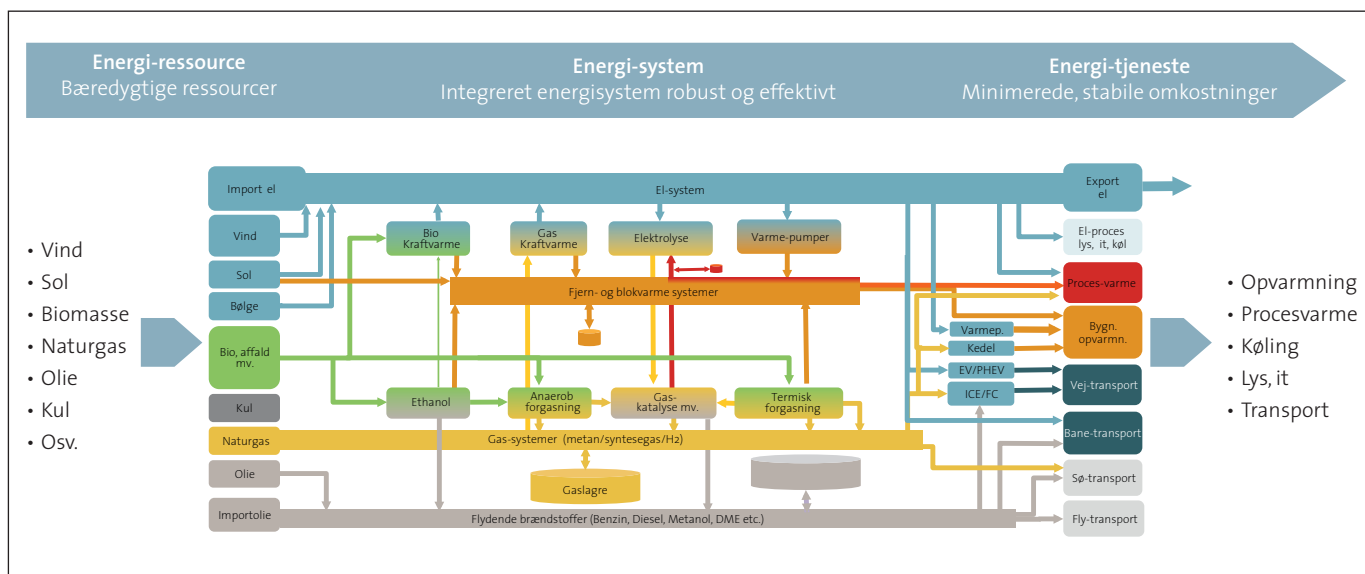
En β -faktor på 0 angiver, at omkostningen til energitjenesten ikke påvirkes af ændringer i ressourceprisen, og en faktor på 1 angiver, at ændringer i omkostningen til energiresourcen slår udæmpet igennem på omkostningen til energitjenesten⁷. (Et klassisk eksempel på høj β -faktor er her Danmarks energisystem før oliekrisen).

Ved at sikre en høj dæmpning i energisystemet kan β -faktorerne minimeres, hvorved usikkerhedsleddet og dermed den sikrede energipris reduceres. Eksempelvis kombination af (kraftvarme/varmepumpe/varmelager) giver en høj afkobling mellem elpris og produceret varmepris.

Analysen viser, at en effektiv infrastruktur og energieffektiv systemintegration mellem energibærere i form af el, varme og gas inklusive adgang til de respektive energilagere i energisystemerne i høj grad kan være med til at sikre en sådan robusthed og dæmpning. Det vurderes, at en række systemmæssige tiltag kan styrke denne dæmpning og dermed den overordnede forsyningssikkerhed, hvorved energisystemets evne til at sikre energitjenester til konkurrencedygtige priser styrkes. Tiltagets omkostning skal ses i forhold til alternativ omkostning ved "finansiel" risikoafdækning (hedging).

⁶ Redegørelse om forsyningssikkerheden i Danmark, Energistyrelsen, 2010.

⁷ $\text{Energitjeneste omkostning (Risikoafdækket)} = \text{Energitjeneste omkostning (forventet)} + \beta \times \text{Tillæg Prissikring (ressource)}$.



Figur 3: Værdikæde fra ressource til energitjeneste. Se endvidere bilagsfigur B1 med samlet oversigt over værdikæde og et muligt omstillingsforløb.

2.4 Danmarks styrkepositioner til at realisere den politiske vision

Danmark har en række styrkepositioner til at realisere et energisystem, som kombinerer omkostningseffektivitet med en fuldstændig omlægning til vedvarende energiforsyning. Som særligt centrale styrkepositioner kan blandt andet nævnes:

- Gode vindkraftarealer med relativt lav LCOE⁸ (landvind, offshore, kystnær).
- Store bioaffalds- og residualressourcer fra landbrug og fødevarerindustri.
- Energisystem med god national og international energi-infrastruktur (el, varme, gas).

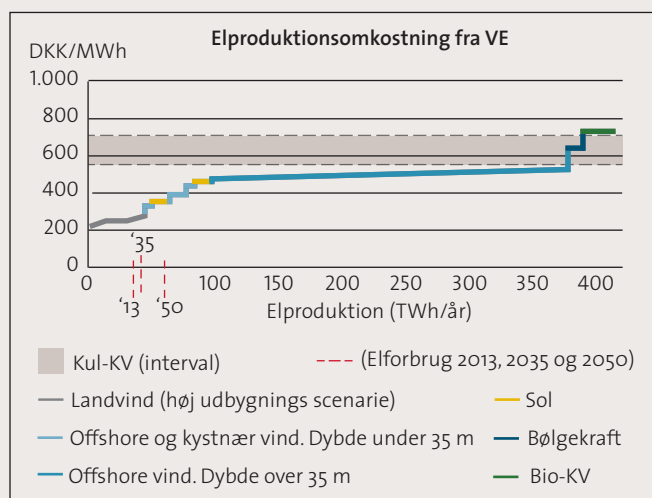
Samlet set har Danmark en række vigtige komparative fordele for et vind/bioaffald energisystem.

2.4.1 Vindkraft som konkurrencedygtig energiressource

Set i forhold til "cost of energy" eksklusive integration og balancering forventes vindkraft på længere sigt at være en relativt konkurrencedygtig ressource til elproduktion⁹.

Det er samtidig en brændselsfri ressource, og der er dermed en relativt høj sikkerhed om produktionspris.

Det vurderes derfor at være afgørende, at integrationsomkostninger til vindkraft bringes ned på et niveau, så vindkraften er



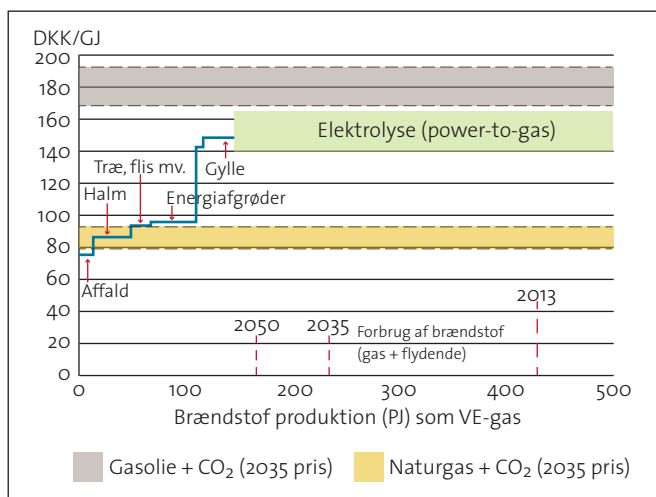
Figur 4: Langsigtede samfundsøkonomiske omkostninger inklusive investering (LRAC) i 2030 for elproduktion. Omkostningsniveau for kul-KV er angivet for IEA New/Current policy og 450 PPM. Barmarks anlæg for sol er ikke vist på figur. Klimakommissionen har tidligere angivet 25 TWh som et eksempel på potentiale.

konkurrencedygtig inklusive systemindpasning og sikring af stabil/sikker leverance af energitjenester.

Analysen af potentialer for vindkraft på land indikerer, at en væsentlig del af det langsigtede udbygningsbehov vil kunne realiseres på land og til en væsentlig lavere omkostning end offshore vindkraft. Forskellige grader af udbygning er analyse-

⁸ LCOE: Levelised Cost Of Energy=Samlede omkostninger for (CAPEX+OPEX) for energiproduktion, men eksklusive integration i energisystemet.

⁹ Technology data for energy plants, Energistyrelsen og Energinet.dk, maj 2012 med enkelte revisioner oktober 2013 og januar 2014 og februar 2015.



Figur 5: Langsigtede gennemsnitsomkostninger inkl. investering (LRAC i 2030) og potentiale fra DK-ressourcer til VE-gasproduktion (potentiale/omkostningskurve). Omkostning er vist for den ikke rensede og opgraderede VE-gas. Nederst i figuren er vist brændstof-forbrug i 2013 og scenarie for 2035 og 2050.

ret, herunder både simpel "repowering og sanering" af vindmølleparker og større eller mindre grad af nyanlagte vindmølleparker. Omkostningerne ved produktion af vindkraften vokser markant ved stigende mængder udbygning af vindkraft, jf. Figur 4. En høj energieffektivitet kombineret med høj fleksibilitet i anvendelsen af el er derfor også afgørende for den samlede konkurrencedygtighed.

2.4.2 Fleksibel produktion af VE-brændstoffer fra bio, affald og vind

Generelt er en effektiv elektrificering af energitjenester et bærende initiativ for at sikre omkostningseffektivitet i vindscenariet. Men en række energitjenester vil fortsat kræve adgang til brændstoffer. Eksempelvis tung transport, fly og søtransport, visse former af højtemperatur industriel procesvarme, spidslast kraftværker mv.

Der er adgang til meget store mængder brændstofproduktion fra Power-to-gas, jf. Figur 5. Ved en "tænkt" ekstra udbygning med 22 GW vindkraft og Power-to-gas vil det nuværende forbrug af brændstof kunne produceres.

Men denne Power-to-gas produktion er typisk dyrere end produktionen af brændstoffer fra bioaffaldsressourcer, og de fleste biobrændstoffer kræver adgang til en kulstofkilde (CO₂-kilde). Danmark har relativt store mængder biomasse og bioaffald, som kan indgå i energiproduktionen. Men set i forhold til det nuværende forbrug af brændstof rækker de nuværende bioressourcer ikke til biobrændstofproduktion, der tilnærmelsesvis kan dække behovet for flydende brændstoffer i dag, jf. Figur 5.

Dertil kommer, at Danmark i dag anvender biomassen til andre formål, herunder varmeproduktion som ikke vedrører brændstofproduktion.

Som det fremgår af Figur 5, er der kun en begrænset mængde "billige" bio- og affaldsressourcer til rådighed i Danmark. Det vurderes derfor at være centralt for konkurrencedygtigheden gradvist at få omlagt biomasse og affald, der i dag anvendes til opvarmningsformål (varmekedler med ingen eller lav elproduktion) til brændstofproduktion. Dette er en proces, som involverer affaldshåndtering, og omlægningen skal forventeligt ske over en længere årrække.

Tilsvarende er det afgørende at afkoble brændstofforbruget fra energitjenester, der kan elektrificeres. Figur 5 indikerer et bud på en reduktion af brændstofforbruget fra 2013 frem til 2035 og 2050 ved effektiv elektrificering og udnyttelse af overskudsvarme til opvarmning og procesvarme. Med denne omlægning af energiforsyningen bliver de tilbageværende brændstofafhængige energitjenester i højere grad konkurrencedygtige med fossile løsninger, pris for fossile brændstoffer inklusive CO₂ sammenholdt med vedvarende energibaserede brændstoffer.

Det vurderes at være nødvendigt at tilpasse de nuværende rammebetingelser for, at selskabsøkonomiske rammer i højere grad understøtter denne omstilling. I figuren er omkostningen til VE-gas, som er produceret fra biomasse- og el, angivet. En yderligere konvertering af VE-gassen til flydende brændstoffer i transportsektoren kan være relevant afhængig af transportaktiviteten.

3. Konceptløsninger til et effektivt vedvarende energisystem

3.1 Generelt

Scenarieanalyser af et vindscenarie viser, at selv med en høj energieffektivitet vil det være nødvendigt at udbygge vindkraften således, at vindproduktionen bliver 3-5 gange så stor som i dag. Udfordringer i forhold til elinfrastrukturkapacitet, spidslast elkapacitet, elbalancering og indpasning af vindkraft osv. forøges markant i de kommende årtier. Nye typer af løsninger (koncepter), som imødekommer disse udfordringer omkostningseffektivt, er derfor centrale at identificere, både af hensyn til strategi for systemudvikling (FUD) og systemplanlægning af el- og gasinfrastruktur.

Koncepterne lægger i særlig grad vægt på at reducere systemomkostningerne:

- Minimering af omkostninger til spidslast elkapacitet.
- Øget udnyttelse af elnettet (transmission/distribution).
- Minimering af omkostninger til elsystembalancering og systemydelse.
- Integration af biomasse- og VE-el til fleksibel produktion af brændstoffer mv.
- Integration af energisystemet på tværs af energibærerne så der indbygges stabilitet i hele forsyningskæden over for resourcepriser (lave β -faktorer).
- Omkostningseffektiv styring af det samlede energisystem.

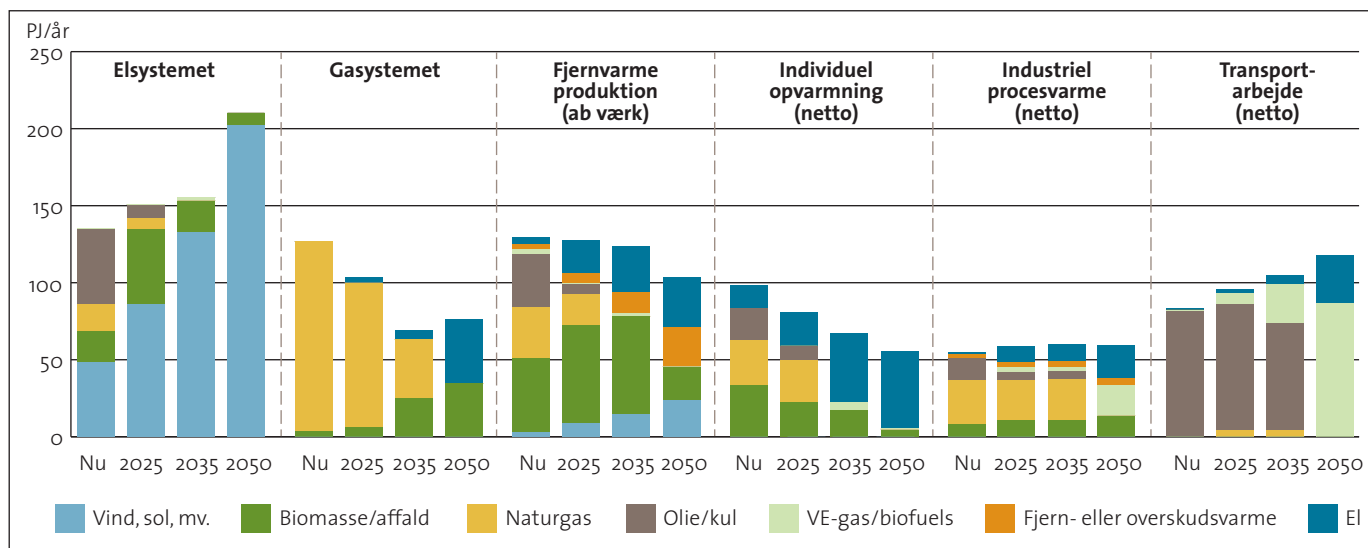
En række koncepter, der er lagt til grund ved systemdesign, er beskrevet i de næste afsnit og nærmere uddybet i rapporten.

3.2 Et muligt omstillingsforløb under hensyn til samfundsøkonomi

Der er gennemført en analyse af et muligt omstillingsforløb frem mod 2025, 2035 og 2050, som imødekommer de politiske visioner inklusive regeringens mål for 2035. I denne samfundsøkonomiske analyse indgår de koncepter til omkostningseffektiv integration af vindkraften, som nærmere uddybes i afsnittene 3.3-3.8. Vurderingen er behæftet med usikkerhed, men det overordnede billede er, at både vindkraft og fleksibelt elforbrug udbygges således, at der gradvist integreres stigende mængder af vindkraften i opvarmning, procesvarme og transportsektoren, jf. figur 6.

Ved et hensigtsmæssigt energisystemdesign vurderes det, at de fleste typer af energitjenester i 2035 kan frembringes fra vedvarende energi til omkostninger, som ligger på niveau med en fossil reference. I denne vurdering antages en teknologiuudvikling svarende til teknologikatalogets forudsætninger. Det antages endvidere, at energisystemet integreres effektivt, således at energikonverteringsanlæg har god markedsadgang for hoved- og biprodukter og derved opretholder et hensigtsmæssigt antal driftstimer. Spidslast elkapacitet, højtemperatur procesvarme og tung transport er de energitjenester, som er sværest at få konkurrencedygtige med en fossil reference.

Naturgas vedbliver under perioden at være et omkostningseffektivt brændstof. Brug af naturgas i visse af disse anvendelser og som buffer og backup i samspil med VE-gas kan være hensigtsmæssigt.



Figur 6: Et muligt samfundsøkonomisk effektivt omstillingsforløb. Se endvidere bilagsfigur med samlet oversigt over energisystemet.

Vindscenariet udviser en høj robusthed over for eksterne rammebetingelser som brændselspriser og CO₂.

3.3 Optimering af systemets energieffektivitet

Produktion af VE-el og produktion af biobrændstoffer har en stigende omkostningskurve, jf. Figur 4. Det er derfor centralt, at energisystemet har en god energieffektivitet i hele værdikæden. En stor del af energitabene (målt som energikvalitet) sker i forbindelse med energikonverteringen, og fokus på energieffektive konverteringsprocesser er centralt for den samlede systemomkostning, jf. Figur 7, der viser energieffektivitet ved konvertering. Ved en stigende andel af teknologier med lav konverteringseffektivitet, se højre side, øges behovet for anvendelse af dyrere vindkraftressourcer i vindscenariet.

I systemdesign er der lagt vægt på at reducere de konverteringer, som har høje energitab, og som samtidig kan realiseres omkostningseffektivt.

Tiltag til at øge energieffektiviteten:

- Omstilling af kedler i opvarmning til varmepumper.
- Højtemperatur varmepumper i industriprocesvarme.
- Minimere biomasse- og affald som grundlastvarme og kraftvarme. Forsyningsikkerhed sikres ved spidslastværker og samspil med udlandet.
- Udnyttelse af højtemperatur procesvarme fra termisk forgasning af biomasse og biofuelproduktion ved Power-to-gas-system og til procesvarme.

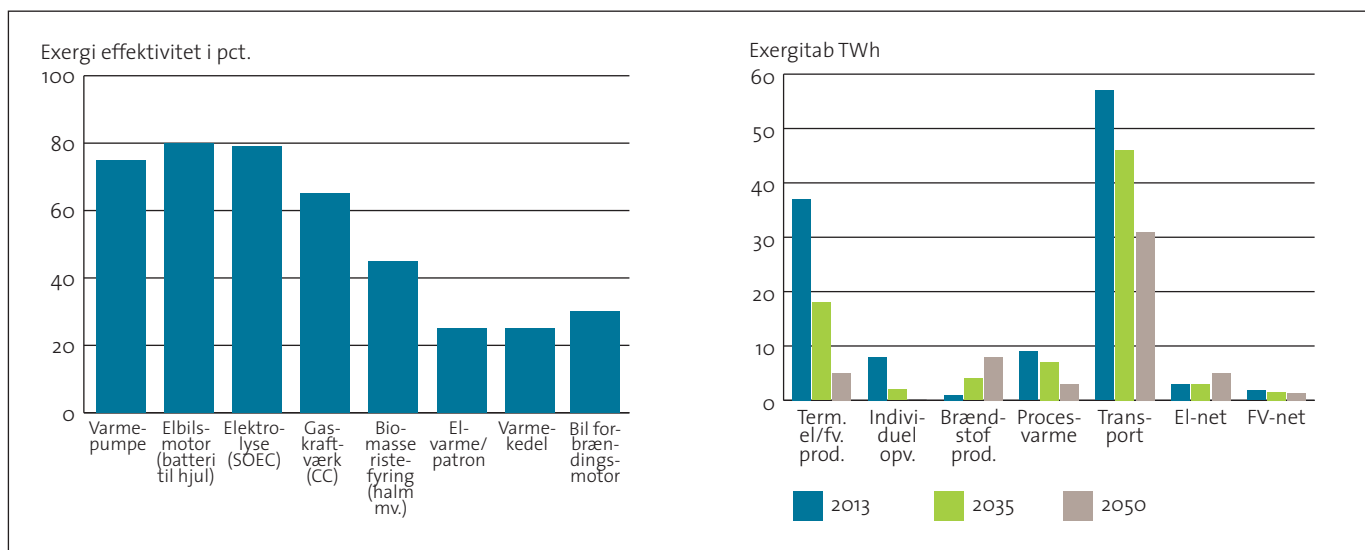
- Minimere opgradering af VE-gas ved at have lokale net med VE-gas i samspil med gas af naturgaskvalitet i overordnet net.

Udvikling i energitab i det samlede system fremgår af Figur 7. Systemets elforbrug bliver herved ved fuld omstilling til vedvarende energi på ca. 60 TWh, hvilket er ca. 20 pct. lavere end et klassisk vindscenarie. Herved ligger behovet for vindkraft (land og offshore) samlet på ca. 50 TWh. Hvis der prioriteres en væsentlig udbygning af landvind, så kan vindkraften realiseres uden at anvende de relativt dyrere arealer på dybt vand, jf. Figur 4.

3.4 Europæiske 10-års vind-/soltidsserier vurderes i systemdesign

Vindkraft og sol får en meget central rolle i vindscenariet. Et energisystem, der samlet set er robust (lav β -faktor) over for vindkraftens fluktuationer både i normalår og i mere afvigende år, er vigtigt i forhold til den samlede forsyningsikkerhed.

Som grundlag for vurdering af disse forhold er der foretaget en analyse af danske og europæiske vind-/soltidsserier over en 10-årig statistisk periode. Denne analyse er sammenkørt med scenarieanalyser for både Danmark og vores nabolande i 2035/2050-scenarierne. Der er blandt andet analyseret forsyningsikkerhed i kortere og længere perioder med lav produktion af vind/sol, både i Danmark og i Nordeuropa. Analysen peger på, at fleksibelt elforbrug kan være effektivt til at håndtere udfordringer med hurtige ændringer i vindproduktion (ramper) som regulerkraftydelse og som afbrydeligt forbrug i særlige vind-/solsvage perioder i Danmark på op til 12 timer. Men



Figur 7: Til venstre teknologivirkningsgrad (exergi), til højre beregnede exergi-tab i scenarie med høj energieffektivitet
 *1) Effektivitet ved varme vist som Carnot virkningsgrad og en enhed fjernvarme er 25 pct. værdi i forhold til el og brændstof.

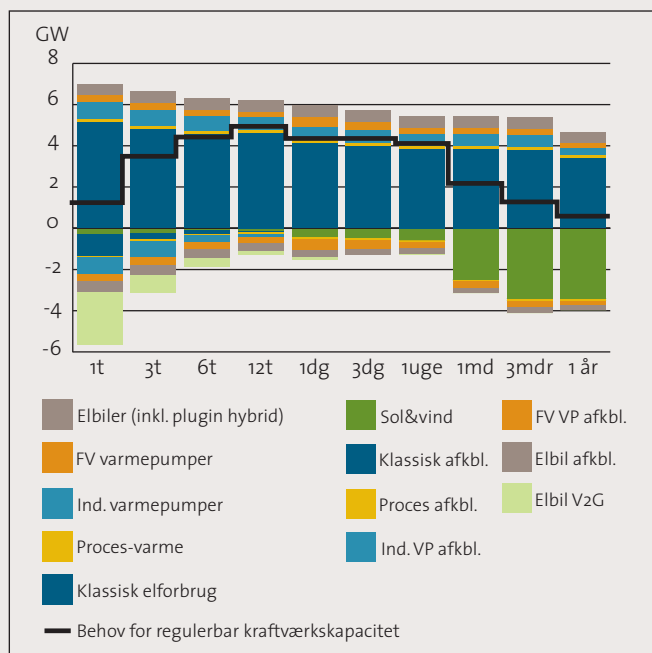
ved vindsvage perioder på mere end 12 timer er adgang til fleksibelt elforbrug minimalt, og der er behov for andre virkemidler, jf. Figur 8. Her er adgang til effekt fra kraftværker og udlandsforbindelser centralt for forsynings sikkerheden. Der er analyseret adgang til effekt fra udlandet i perioder, hvor Danmark er særligt presset.

Analysen viser, at områder med lidt større afstand til Danmark (over 500 km) mest effektivt kan bidrage med effekt i disse særlige perioder. Herunder blandt andet Norge og Storbritannien. Analyserne viser, at disse områder har overskud af effekt i de særlige perioder, hvor Danmark er kapacitetsmæssigt under pres.

Systemanalyser viser, at energisystemet i samspil med internationale forbindelser samlet set kan lagre den nødvendige energi til at balancere variationer fra både vindkraft og sol for scenarier i både 2025, 2035 og 2050. Jf. figur 10 og figur 11 der viser brug af udlandsforbindelser til balancering og adgang til lager i energisystemet 2035.

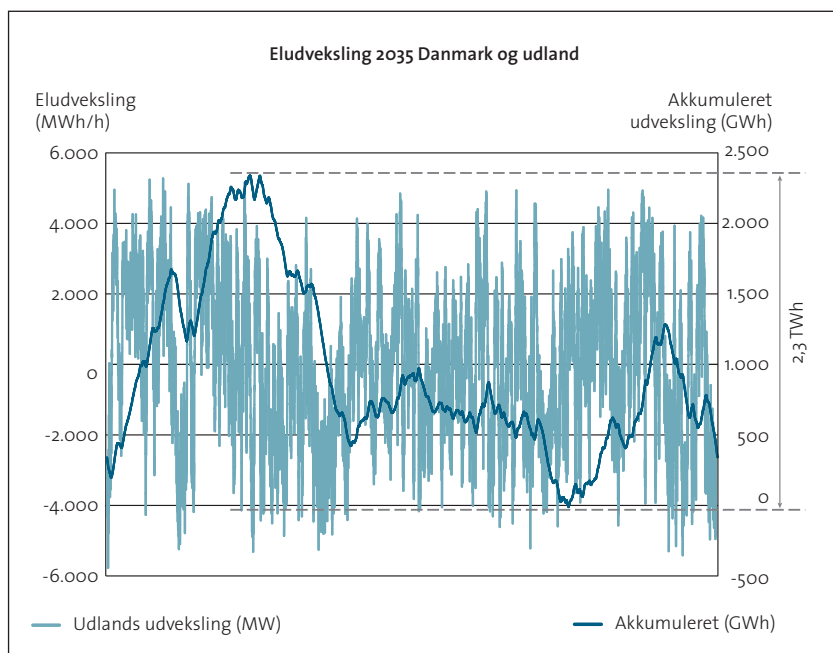
3.5 Nye principper for drift af elnettet i samspil med det øvrige energisystem

I eltransmissionssystemet anvendes i dag netreserve som designkriterie. Det vil sige, at der skal være reservekapacitet i nettet, så der kan håndteres et udfald af største enhed (fx en transmissionsforbindelse eller en elproduktionsenhed). Der er blevet analyseret et koncept, hvor det fleksible elforbrug anvendes som netreserve. Potentiel effektlevering fra V2G¹⁰ på det helt lange sigt.

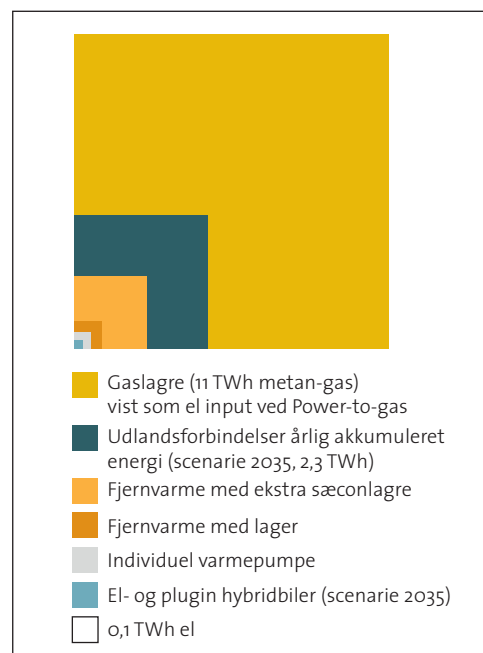


Figur 8: Figuren viser i scenarie 2035 det maksimale behov for residual produktion af el (elforbrug minus vind/sol produktion) ved forskellige periodelængder. Beregningen er baseret på 10-års vind/sol tidsserievariation. Positiv del af søjler viser elforbruget og negativ del viser vind/sol og afbrydeligt forbrug. Det resulterende behov for kapacitet er vist med sort linje.

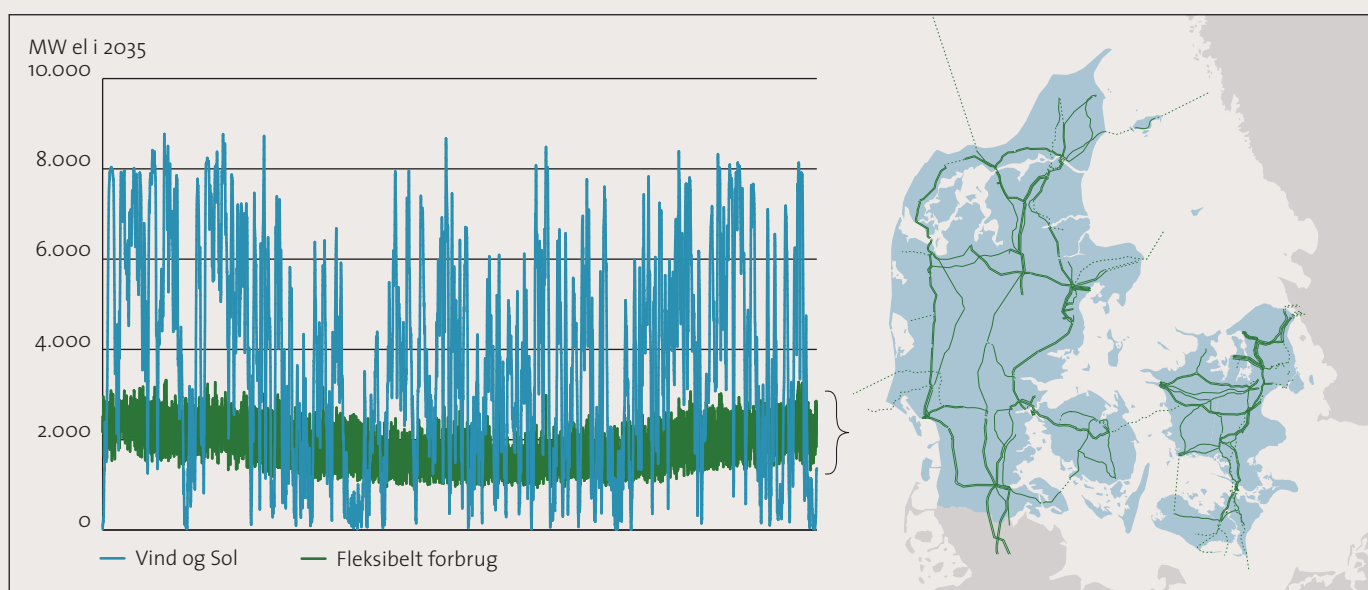
¹⁰ V2G=Vehicle to grid (systemløsning hvor elkøretøj kan reversere ladning og levere effekt til net).



Figur 10: Eludveksling over udlandsforbindelser i 2035.



Figur 11: Lagerkapaciteter i energisystemet 2035 vist som areal.

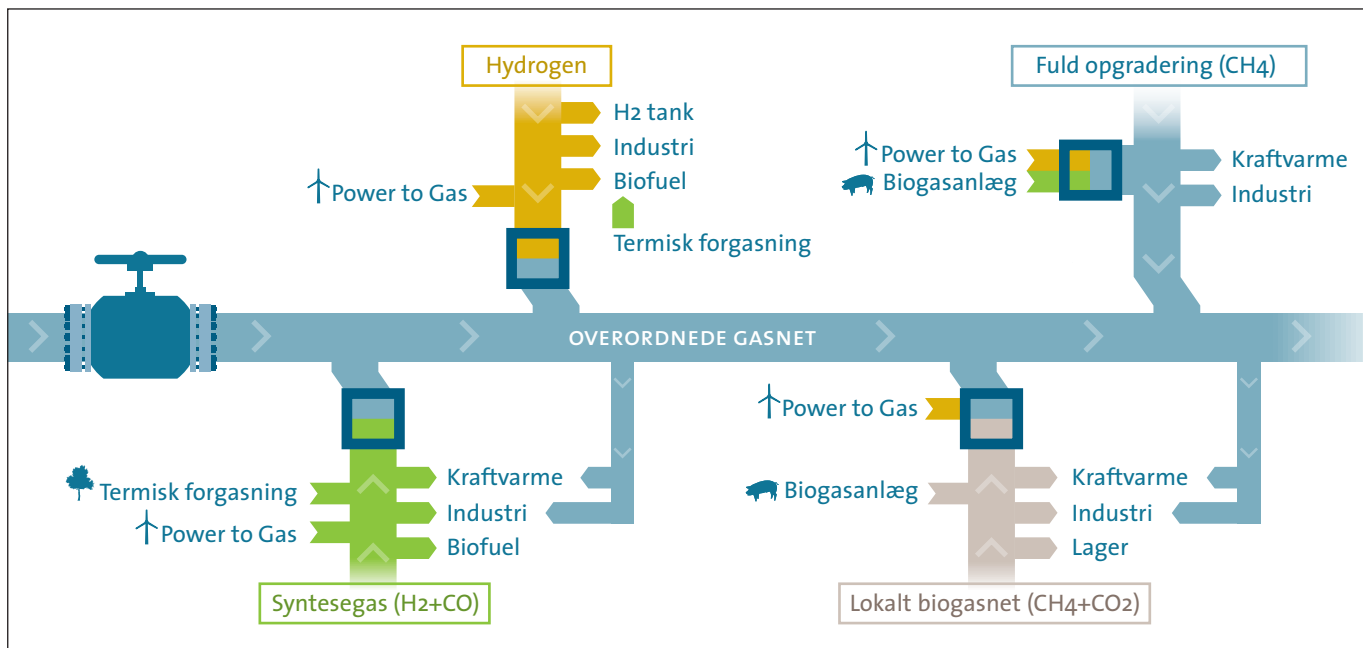


Figur 9: Det fleksible forbrug pr. time og geografisk placering i stationer analyseres som mulig netreserve i elnettet, hvorved udnyttelsesgraden kan øges.

Herved kan udnyttelsen af transmissionsnettet forøges. Net-analyser med en specialudgave af netanalyseværktøjet "Power-World" peger foreløbigt på, at dette koncept kan forøge udnyttelsen af eltransmissionssystemet og dermed reducere omkostningerne til udbygning af systemet på det lange sigt. Energinet.dk vil i det videre arbejde med perspektivering af Netudviklingsplanen analysere koncepter for øget udnyttelse af elnettet.

3.6 Systemydelser fra fleksibelt elforbrug

Analysen viser, at der ved en samfundsøkonomisk hensigtsmæssig omstilling vil være relativt store mængder fleksibelt elforbrug frem mod 2025/2035. Der er analyseret behov for regulerkraftydelser i 5-minutters intervaller ved de stigende mængder fluktuerende el fra vind og sol. Disse er sammen-



Figur 12: Principper for samspil mellem lokale VE-gasnet (biogas, syntesegas, H₂) og det overordnede gasnet.

holdt med tilgængeligt, hurtigt regulerbart elforbrug. Analysen for 2035 viser, at fleksibelt forbrug i mere end 95 pct. af tiden principielt vil kunne levere en nødvendig regulerkraftkapacitet til balancering inden for driftstimen. Markedsløsninger, der realiserer dele af dette potentiale, vil være centrale i forhold til tilpasning af markedsmodeller til disse ressourcer.

3.7 Integration mellem nye lokale VE-gasnet og det overordnede gasnet

Energiforligsanalyserne pointerer, at gassystemet og VE-gas kan være et vigtigt virkemiddel til at sikre forsyningsikkerhed og indpasning af energi fra biomasse og VE-el fra vind/sol. Men det fremhæves også, at netop omkostningen til opgradering af VE-gas til naturgaskvalitet (SNG) kan være forholdsvis bekostelig. Der er derfor vurderet en række perspektiver for, hvordan lokale gasnet med VE-gas (biogas, syntesegas og H₂) og det overordnede gasnet i højere grad kan integreres, således at der opnås forsyningsikkerhed ved backup fra det overordnede gasnet, samtidig med at omkostninger til opgradering begrænses, jf. Figur 12. Der er behov for et styrket samarbejde mellem gas-TSO og -DSO'er for at sammentænke og analysere forskellige typer af løsninger og håndtere krav til gaskvalitet på lokale net.

3.8 Perspektiv i øget højtemperatur integration i energisystemet

3.8.1 Højtemperatur varmepumper til industri/service

En række nye teknologier kan forventes at øge behovet for en effektiv højtemperatur integration i energisystemet. Analyser

viser, at højtemperatur integration er væsentligt for den samlede systemeffektivitet, jf. endvidere Figur 7.

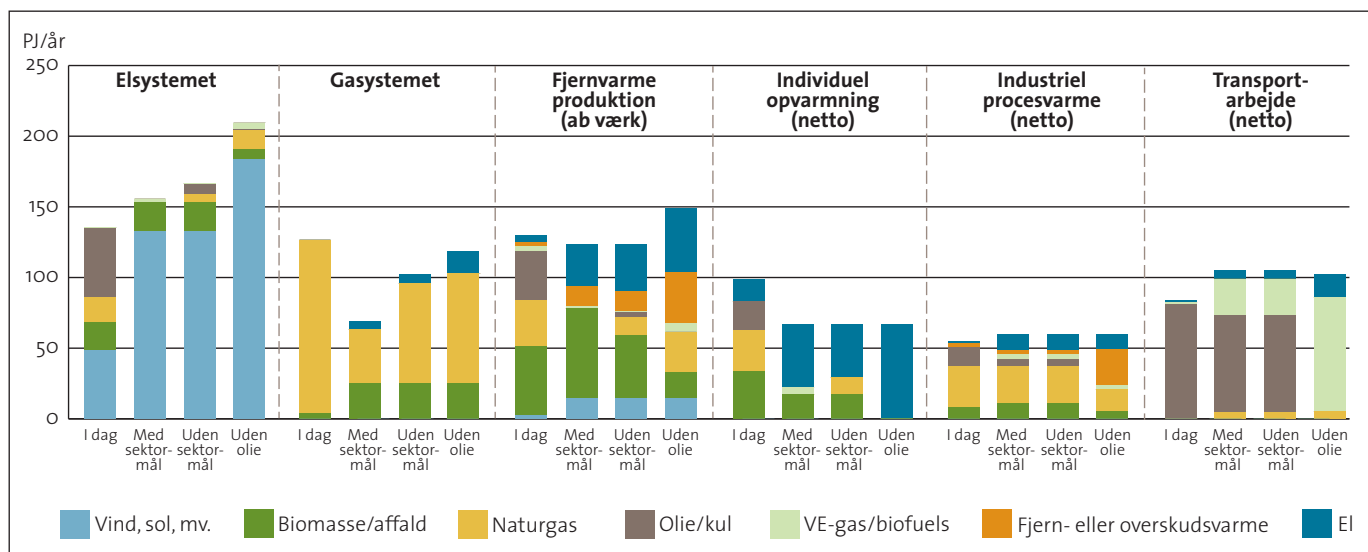
Procesvarme til industri og service produceres i dag primært ved olie eller naturgas. Enkelte industrier anvender i stigende grad biomassekedler. Teknologi til højtemperatur varmeproduktion fra varmepumper er inden for de senere år blevet kommercielt tilgængelig. Der er analyseret potentiale for højtemperatur varmepumper i industrien. Foreløbige vurderinger indikerer, at en væsentlig del af den industrielle procesvarme kan leveres fra varmepumper, der agerer i et samspil med elsystemet og potentielt også fjernvarmesystemet.

3.8.2. Integration af højtemperatur varme i Power-to-gas

Termisk forgasning og brændstofdokatalyse producerer overskudsvarme ved temperaturer typisk over 350 grader. Nye typer elektrolyse (SOEC) kan fleksibelt optage/afgive varme, afhængigt af driftstilstand. Herved åbnes for nye muligheder for effektiv brug af højtemperatur varme. En direkte anvendelse af denne højtemperatur varme til fjernvarme vil være forbundet med væsentlige energitab (tab af energikvalitet), og analysen viser, at energiresourcebehovet og den samlede systemomkostning kan reduceres ved effektivt at integrere højtemperatur varme i energisystemet.

3.9 Omkostningseffektiv styring af energisystem til nye koncepter

Grundlaget (fysisk) for den nødvendige fleksibilitet i energisystemet vurderes at være til stede, jf. Figur 10 og Figur 11.



Figur 13: Scenarier for energisystemet i 2035 ved forskellige omstillingsforløb. 1) Med sektormål om fossilfri el- og varme, 2) Uden sektormål men fortsat en del biomasse i el og fv og 3) Ved omlægning til energisystem uden olie og minimeret biomasse i el og fv. En del af VE-gassen anvendes direkte i brændstofproduktion. Se energistrøms-diagrammer i bilag.

En forudsætning for at aktivere den fleksibilitet, der er tilgængelig i energisystemet, kan være markedsløsninger, hvor både el, varme og gas varierer i pris ned på forbrugerniveau. Markeder med realtidspris kan udgøre en stor styrke, men også en styringsmæssig udfordring i forhold til systemstabilitet. En styrket viden om samspil mellem markedsmodeller for både el, gas og varme og den underliggende dynamik i energisystemet er afgørende for fastholdelse af stabilitet i det samlede energisystem og systemsikkerhed.

3.10 Robusthed over for ændringer i omgivelsesbetingelser

For at vurdere robusthed af tiltag i energisystemet er der gennemført en række følsomhedsanalyser af systemet frem mod 2035. Det er analyseret, hvordan ændringer i udlandets rammebetingelser påvirker systemudviklingen, givet at markedet sikrer en samfundsøkonomisk effektiv omstilling. Herunder er vurderet et "grønt" og et "blåt" omgivelsesscenarie og omstilling med/uden sektormål i 2035 omkring fossilfrihed i el og fjernvarme. For udlandet er scenariet baseret på ENTSO-E visionerne 1 og 4 for Europa. De beskrevne systemtiltag vurderes at være robuste overfor udvikling i udlandets rammebetingelser.

Der er i denne forbindelse også analyseret et scenarie, hvor fossil olieforbrug udfases af det danske energisystem frem mod 2035. Dette medfører behov for en stor produktion af bio-brændstoffer fra termisk forgasning i samspil med Power-to-Gas. For at realisere denne omstilling er der behov for primært

at allokere biomasse og affald til brændstoffer og i langt mindre grad til varme og el. I dette scenarie er der samtidig en højere andel af landvind og solceller og en højere andel af el- og hybridbiler, dog således at elbilerne først indføres i takt med at de forventes konkurrencedygtige, jf. data fra Alternative drivmidler til transportsektoren.

Forbruget af naturgas øges i dette scenarie, hvor olie er udfaset i 2035, fra ca. 40 PJ til 80 PJ naturgas. Men da olien samtidig udfases af energisystemet, reduceres den samlede CO₂-udledning fra ca. 14 mio. ton i 2035 referencescenariet til ca. 6 mio. ton CO₂. Økonomisk er denne tilgang sammenlignelig med referencescenariet under antagelse af udvikling i brændselspriser, jf. IEA New Policies scenariet og teknologidata forudsætninger. Konkurrencedygtigheden af dette scenarie afhænger af at:

- Der er adgang til at udnytte overskudsvarme fra brændstofprocesser til industriel procesvarme, som input til Power-to-gas og som fjernvarme. Det vil sige, hvis dette varmemarked er udfyldt af etablerede anlæg, så bliver økonomien dårligere.
- Gassystemet integreres med disse processer sådan, at syntesegassen indgår i et marked, jf. flow-figur i Bilag og Figur 12.
- Billige bio-restprodukter og affald mv. ikke er allokert til anden side. (jf. Figur 5).
- At teknologien til biofuel produktion udvikles jf. teknologidata forudsætninger.

Aktiviteterne med systemintegreret brændstofproduktion kan potentielt ske i områder, hvor der i dag er kraftværks- og affaldsforbrænding.

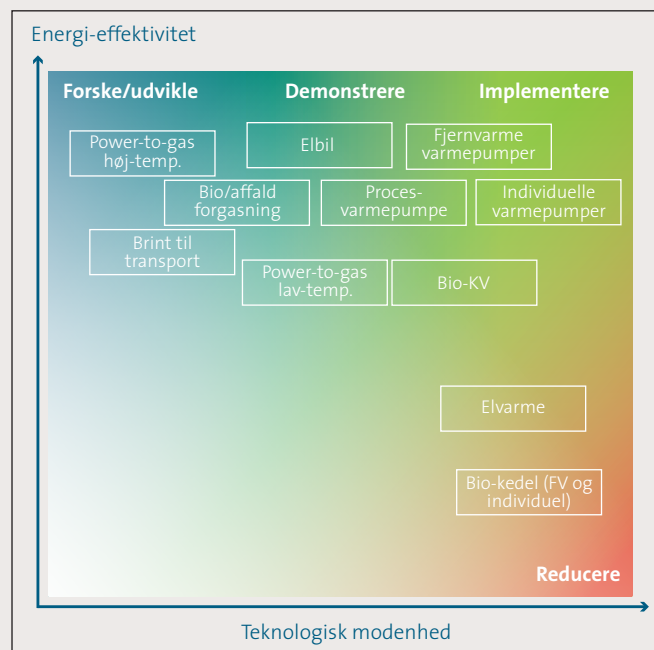
4. Fra forskning og udvikling til implementering

Analyserne peger på, at en høj energieffektivitet og fleksibilitet i energisystemet er centralt for at gøre et energisystem med store mængder vindkraft konkurrencedygtigt med en fossil reference. En del af de bærende energieffektive løsninger i fremtidens energisystem er i dag markedsmodne og kan implementeres i stort omfang, eksempelvis varmepumper til varmeproduktion. Men en række af de potentielle, fremtidige løsninger kræver en indsats med forskning, udvikling og demonstration (FUD) for at blive modne til udrulning i større skala.

Figur 14 illustrerer indikativt modenhed og energieffektivitet i forskellige centrale konverteringsteknologier. Figuren indikerer, hvilke løsninger der er klar til at implementere, eller som alternativt kræver FUD.

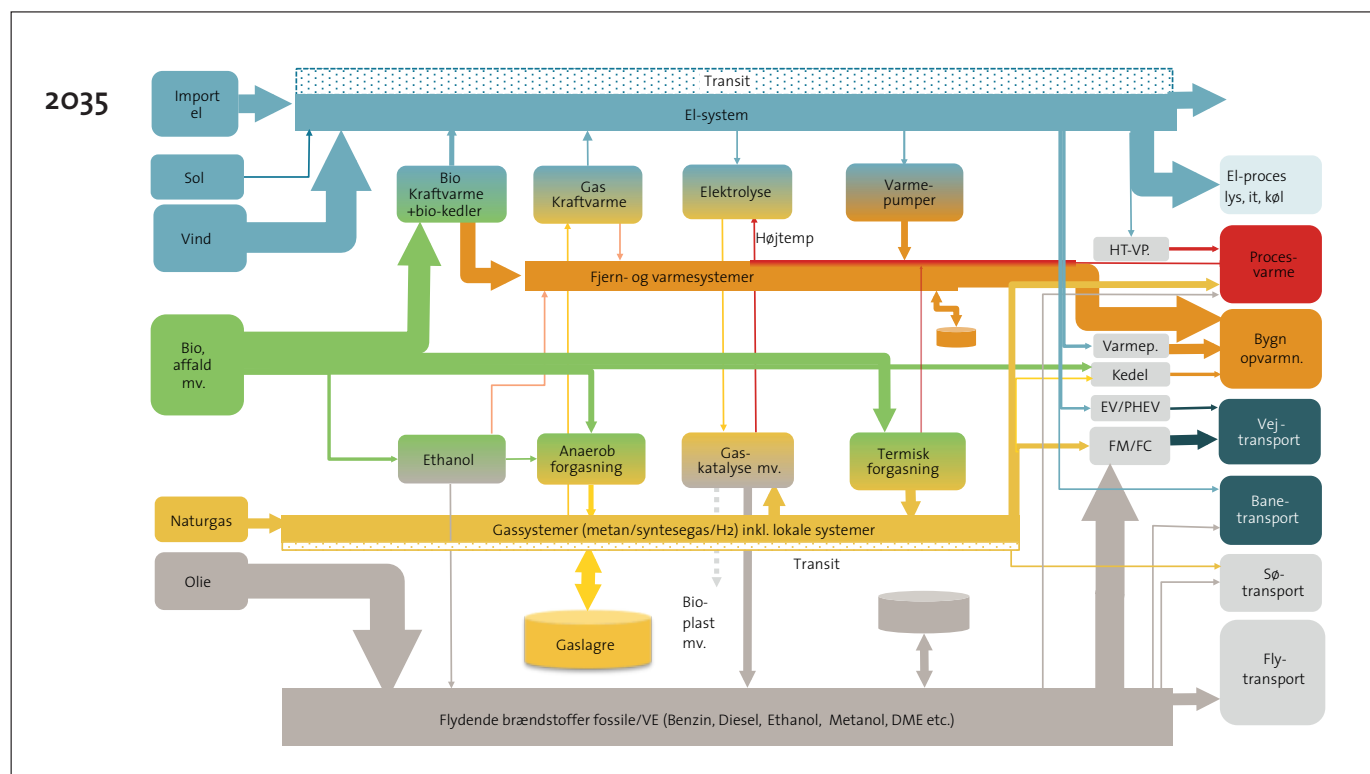
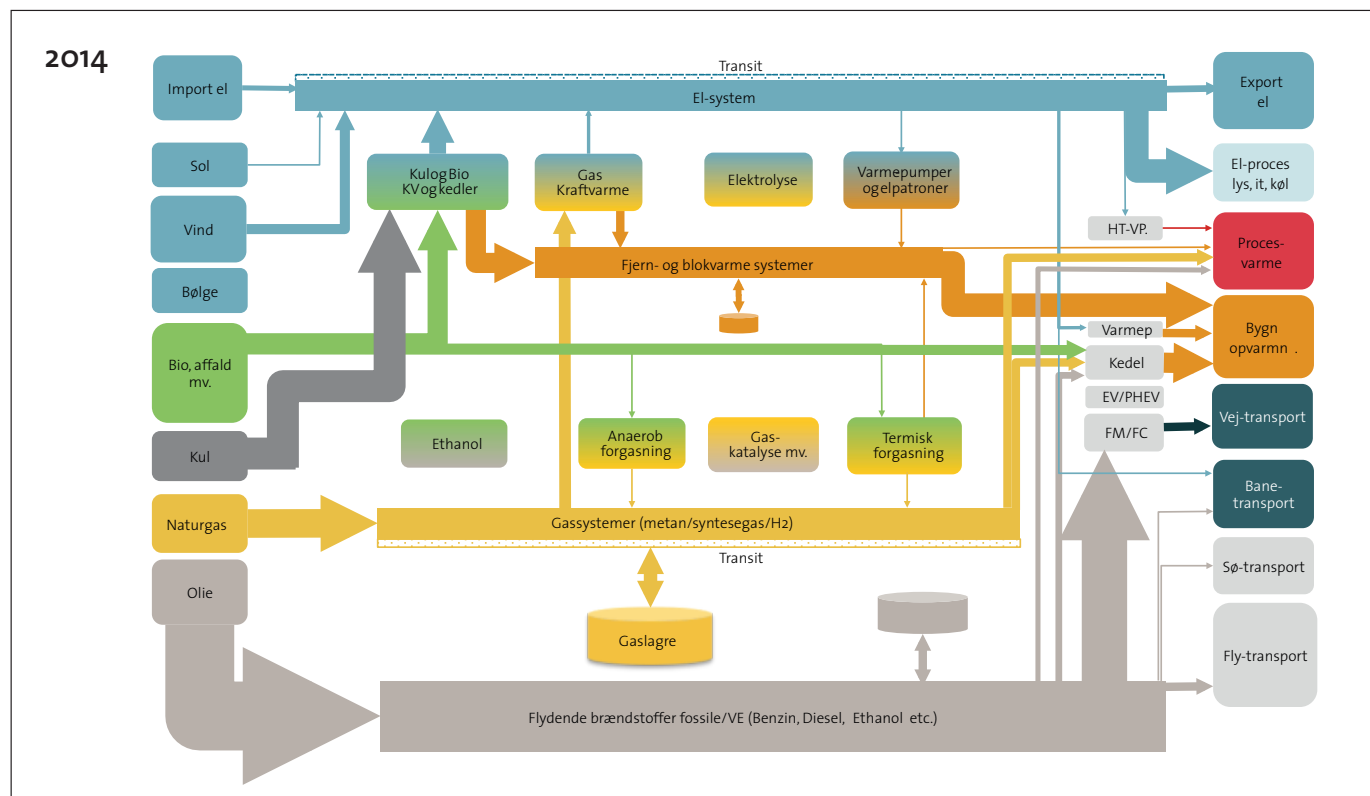
Som det fremgår af Figur 14, er teknologier til elektrificering af opvarmning i dag relativt markedsmodne. Det er vigtigt, at rammebetingelserne understøtter, at disse teknologier realiseres i det omfang, det er samfundsøkonomisk hensigtsmæssigt.

En forudsætning for at realisere en effektiv drift af teknologierne er styring og marked. De danske forskningsprogrammer understøtter udvikling af nye komponenter og løsninger i et vedvarende energisystem og udvikling af styringsløsninger. Energinet.dk vil prioritere vidensdeling mellem systemanalyser, der gennemføres i Energinet.dk og specifikke forskningsmiljøer på universiteter, og understøtte, at Danmark globalt fastholder en stærk position på området.



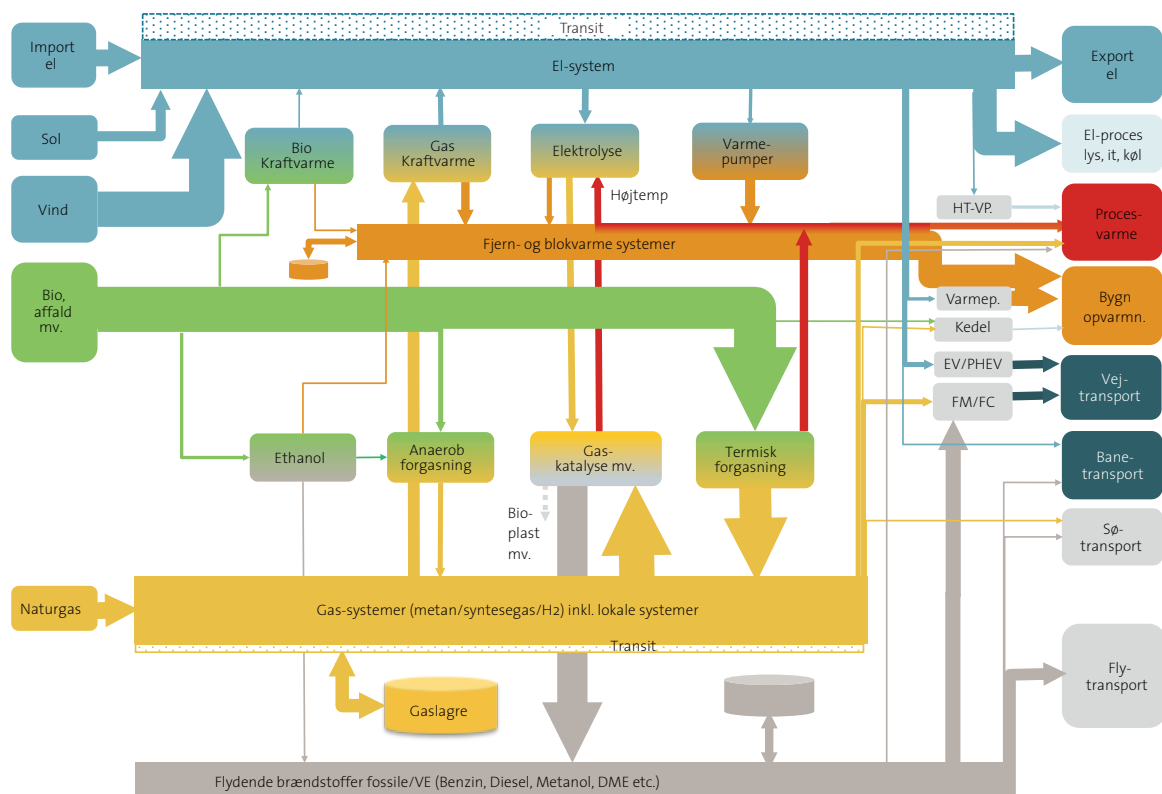
Figur 14: Indikativ illustration af energiteknologiers modenhed og energieffektivitet.

Bilag



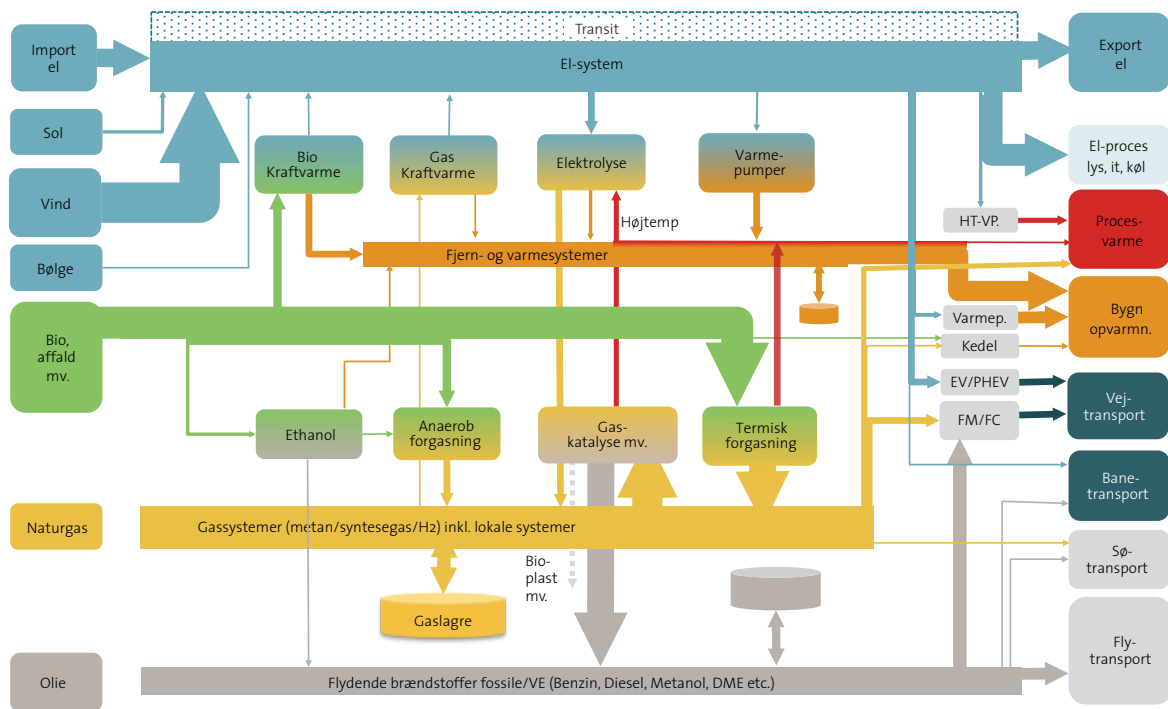
Energistrømme i scenarier for 2014, 2035 og 2050. Pile med energistrømme er indikativt skaleret. Der henvises til baggrundsdata for en mere præcis beskrivelse af energistrømme.

2035



2035 – Uden fossil olie i energisystemet

2050



Energinet.dk
Tonne Kjærvej 65
7000 Fredericia
Tlf. 70 10 22 44

info@energinet.dk
www.energinet.dk



Vi forbinder energi og mennesker