

På vej mod det fossilfrie Danmark

I år 2035 skal al energien til el og opvarmning i Danmark komme fra vedvarende energikilder. Der tegner sig nu en realistisk model for, hvordan dette kan lade sig gøre.

Forfatterne



Benjamin Biegel er ph.d.-studerende ved Institut for Elektroniske Systemer, Aalborg Universitet
benjamin@biegel.nu



Carsten R. Kjaer
Aktuel Naturvidenskab
crk@aktuelnaturvidenskab.dk

I hele december måned 2013 dækkede vindenergi mere end 50 % af det samlede danske elforbrug. Udover at være verdensrekord er det også en antydning af, at det er realistisk for Danmark at opnå de klimamål, der skal frigøre Danmark fra fossile brændstoffer og basere energiforsyningen 100 % på vedvarende energikilder i 2050. Det første delmål er i 2020, hvor planen er, at vindenergi skal dække 50 % af elforbruget. For hele året 2013 var resultatet, at vindenergi dækkede 33 % af elforbruget i Danmark, så der er altså stadig et stykke vej til dette delmål. Det understreger den grundlæggende udfordring, at en elforsyning, der i høj grad er baseret på vindenergi, populært sagt opfører sig – ja, som vinden blæser. Det drejer sig dermed ikke *kun* om at opstille et meget stort antal vindmøller. I lige så høj grad handler det om at få mange forskellige decentrale energiproducerende enheder til at spille sammen med alle de andre elementer, der udgør det samlede danske energisystem. Og det handler også om, at få de *energiforbrugende* enheder til at opføre sig “intelligent”.

Den danske model

Den populære betegnelse for et sådant intelligent energiforsynings-netværk er *Smart Grid*, som i høj grad er blevet et buzz word. Og det er et område, hvor vi i Danmark er helt i front på verdensplan – netop fordi vi i mange år har satset massivt på vind-

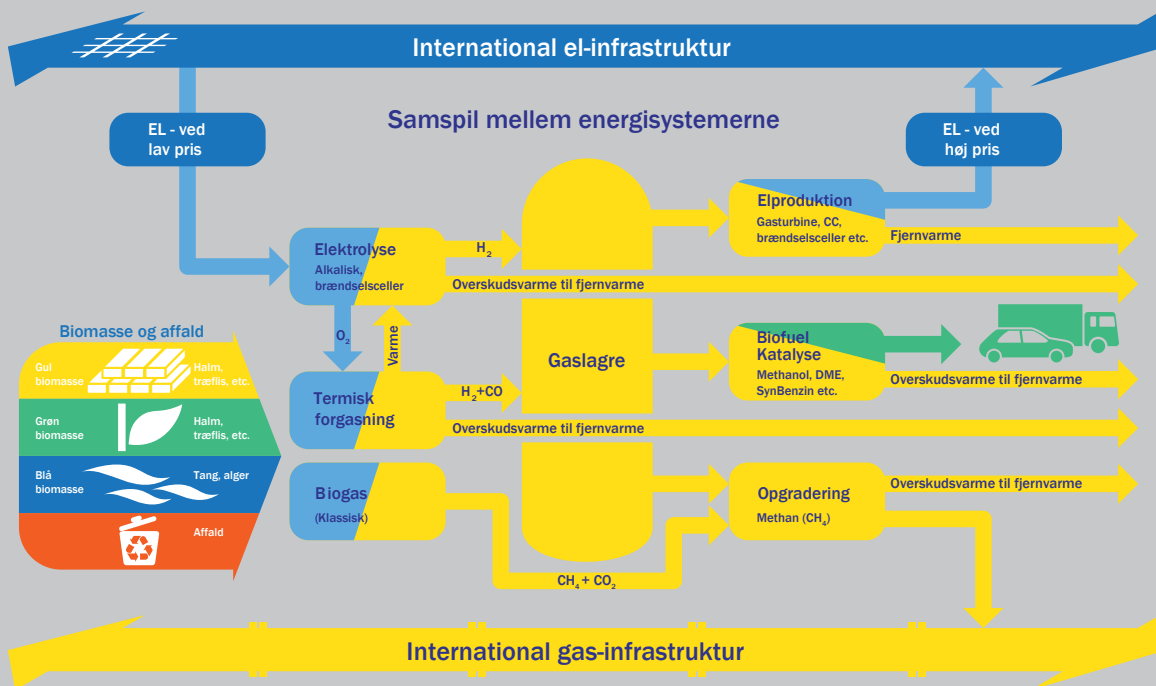
energi. Der tegner sig nu en realistisk model for, hvordan det danske elektricitetssystem kan være skruet sammen i 2035. Til den tid skal vedvarende energi efter planen dække 100 % af energiforbruget til elektricitet og opvarmning (i 2050 skal også transportsektoren baseres på vedvarende energi). Det er en model, som den ene af artiklens forfattere (Benjamin Biegel) har arbejdet med i sit ph.d.-projekt, og som han nu er draget på turne for at fortælle om på forskningsinstitutioner og private virksomheder verden over.

Helt overordnet går energiforsyning selvfølgelig ud på at balancere energiproduktion og energiforbrug, så man hele tiden har et stabilt system. Modellen for at opnå det i år 2035 indeholder fire hovedelementer: fleksibelt forbrug, varierende produktion af vindmøllestrøm, udvidede transmissionsforbindelser samt lagring af energi som gas.

Virtuelle kraftværker

I et konventionelt el-system med fx naturgas og kulfyrede kraftværker følger produktionen af el blot forbruget, da det er let at skrue op og ned for produktionen.

I et system, hvor der er meget vindenergi, vil det være ønskeligt i et vist omfang også at kunne styre forbruget, hvis man vil undgå at skulle dimensio-



Figuren viser hvordan biomasse kan omdannes til brint som derefter enten kan bruges til at lave el, i transportsektoren, eller opgraderes til methan. Endeligt viser figuren at man via elektrolyse kan omdanne gas til el og derved lagre el over længere tid.

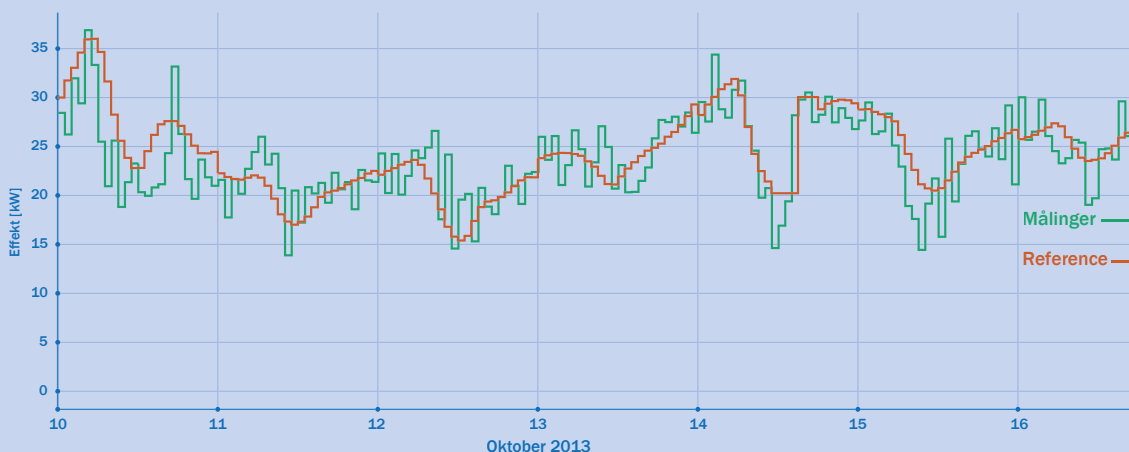
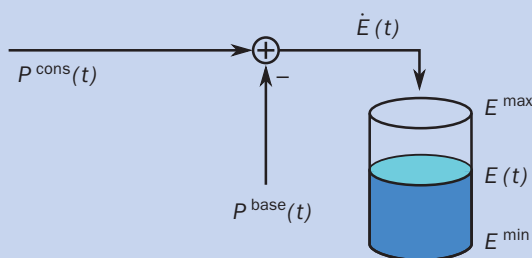
Kilde: Steen Vestervang, Energinet.dk

Optimeringsudfordringer

For systematisk at kunne udnytte forbrugsfleksibilitet i et elsystem er det nødvendigt med en fleksibilitetsmodel. I forsøget med fjernstyrede varmepumper kan man lave en model af huset for derved at beskrive den energi, man kan lagre i husets termiske masse. Energiniveauet beskrives med enheden E og vil sådan set svare til husets temperatur. For at huset er komfortabelt skal temperaturen holdes indenfor givne grænser (E_{min} og E_{max}), som beboeren selv kan indstille. Hvis varmepumpen ikke fjernstyres vil den have et givent baselineforbrug (p_{base}) for at opretholde indetemperaturen. Øges varmepumpens faktiske forbrug (p_{cons}) over dette baselineforbrug vil energiniveauet stige (\dot{E} positiv). Tilsvarende vil energiniveauet falde, hvis varmepumpen bruger mindre effekt end baselineforbruget (\dot{E} negativ). Det kan illustreres som på figuren med en spand med vand, som kan fyldes op eller tappes af. Hvis man forestiller sig, at man ønsker at styre 10.000 huse vil man så have 10.000 sådanne husmodeller med forskellige parametre. Algoritmen, som styrer disse varmepumper, skal altså kunne håndtere store mængder data, hvilket er en af de store udfordringer i smart grid.

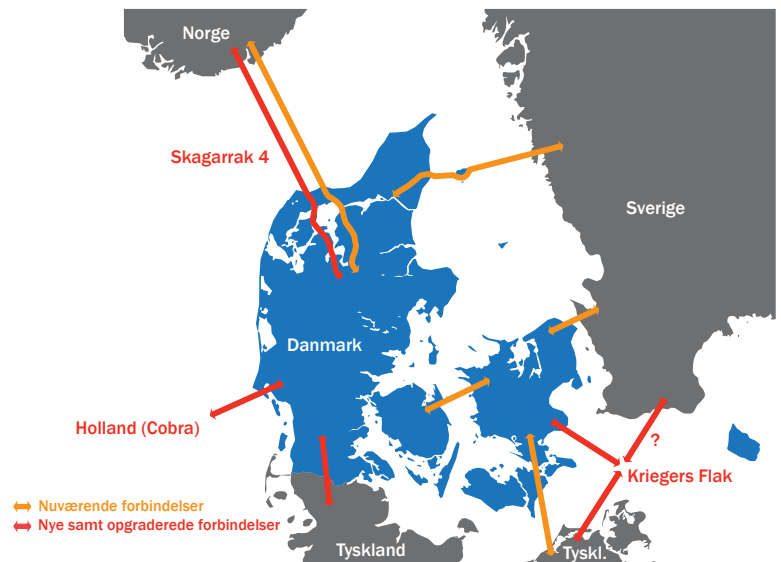


Varmepumper bliver mere og mere udbredte som hovedkilde til opvarmning af helårs-huse. Her ses en luft-til-vand-varmepumpe fra firmaet Danfoss



Effekt-referencen som varmepumpenes samlede forbrug skulle følge sammenlignet med det målte forbrug.

Nuværende (gule) samt nye planlagte (røde) elforbindelser til udlandet. Disse store motorveje for el udgør sammen med de store højspændningsledninger på 132 til 400 kV transmissionsforbindelserne i elsystemet. Mølleparken på Kriegers Flak bliver tilsluttet nettet på Sjælland.



ner energi-systemet med en stor overkapacitet eller bruge andre dyre løsninger på at opnå balance. Styling af elforbruget kan opnås ved at samle typer af fleksible el-forbrugere i større grupper og få dem til at opføre sig som en samlet enhed ved hjælp af intelligent kontrolteknologi. Et godt eksempel er varmepumper til husopvarmning. I et konkret forsøg med 54 varmepumper i private hjem har man vist, at man kan få disse til at opføre sig som et "virtuelt kraftværk". Varmepumperne blev udstyret med effekt-, flow- og temperaturmålere samt en fjernstyring, der kan tænde og slukke for varmepumperne. I forsøget blev varmepumperne styret, så de fulgte en effektreference til det samlede forbrug af de 54 varmepumper. Referencen blev lavet ved midnat for de næste 24 timer.

Forbrugerne oplevede ikke ulemper ved, at de populært sagt havde mistet kontrollen med deres

varmepumper. Og algoritmerne brugt til styringen kan let skaleres, så det er i princippet lige meget, om det er 54 eller 10.000 varmepumper, der bliver styret på denne måde.

Der findes mange kilder til denne form for fleksibilitet i elforbruget, som her er demonstreret ved hjælp af varmepumper. Andre muligheder er kølesystemer i supermarkeder, pumpeanlæg, industriprocesser, elbiler mm. Men det kræver dog, at enhederne er tilpassede, så de let kan tilgås – og det må ikke kræve, at der installeres en masse hardware på de enkelte enheder. I den forbindelse vil man fx kunne udnytte, at moderne termostater allerede i dag kan have indbygget "intelligens" og kommunikation, så man kan overvåge sit hus. Denne kommunikation og computerkraft kan vi altså få "gratis".

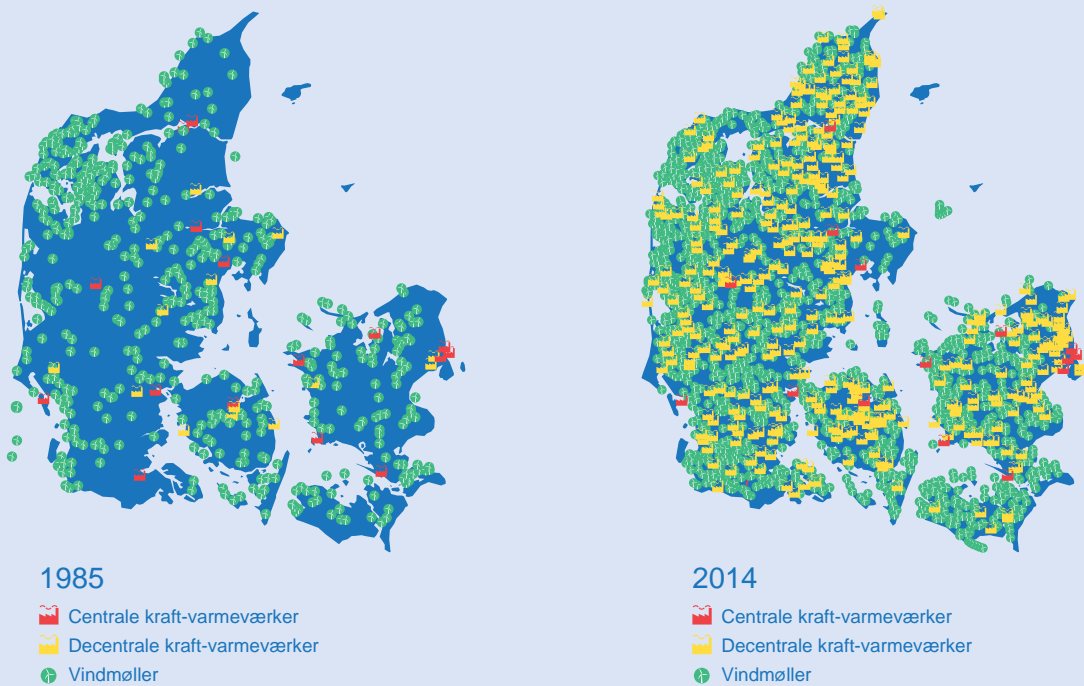
Skrue op og ned for vindmøllerne

Som nævnt kan et el-system med meget vindenergi ikke på produktionssiden skrue op efter behovet på samme måde som et konventionelt el-system. Men i et vist omfang kan man også godt regulere produktionen af vind og bruge det til at bringe balance i det fremtidige el-system. I dag tilstræbes det, at vindmøllerne hele tiden producerer så meget energi som muligt. I et fremtidigt system vil det dog give god mening, hvis man løbende skrue op og ned for vindproduktionen afhængig af det samlede systems krav. Allerede idag med en gennemsnitværdi på 33 % vind i systemet ser vi situationer, hvor der er over 100 % vind, hvilket nogle gange også resulterer i negative elpriser. Eftersom mængden af vind skal øges over den kommende årrække må man forvente dette vil ske oftere. Derfor er det oplagt i fremtiden at bruge vindproduktionen som "systemstabiliserende" element. Det giver derfor god mening at arbejde på at finde de nødvendige tekniske løsninger samt at undersøge, hvordan vindmølle-støtteordningerne på en fordelagtig måde kan understøtte dette.

Reklamefremstød for dansk Smart Grid

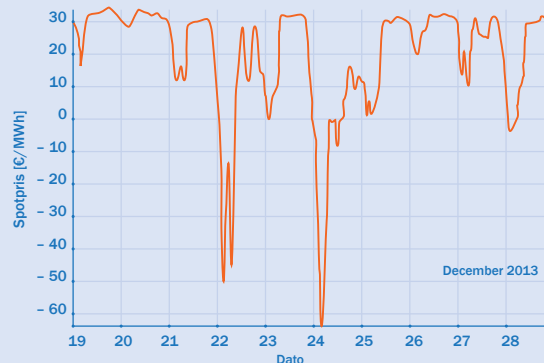
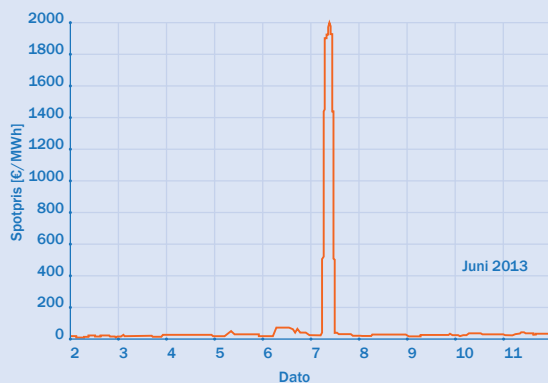
I skrivende stund er Benjamin Biegel taget på verdensturne for at fortælle om den danske energimodel hos forskningsinstitutioner og virksomheder i Europa, USA og Asien. Interessen for at høre om den danske energimodel i udlandet skyldes, at man også i andre lande har målsætninger om, at energiforsyningen i et vist omfang skal baseres på vedvarende energikilder. Den danske model for at integrere vedvarende energi i el-systemet kommer til at fremstå som et meget troværdigt bud på en løsning, da den i så høj grad er baseret på rigtige forsøgsresultater fremfor blot at være baseret på koncepter og simuleringer.

Initiativet til reklamefremstødet kommer fra Jakob Stoustrup, der for tiden har orlov fra sit professorat ved Institut for Elektroniske Systemer ved Aalborg Universitet for at lede en stor satsning på Smart Grid forskning i USA for virksomheden Batelle og det amerikanske energiministerium. Kampagnen er udover Aalborg Universitet støttet af den danske iPower-platform (en strategisk platform for samarbejde om Smart Grid teknologi mellem universiteter og virksomheder) samt en lang række private fonde.



Figuren viser udviklingen i det danske elektriske system fra 1985 til 2014. I 1985 stod 16 centrale kraftværker for langt størstedelen af elproduktionen. I dag er de 16 centrale kraftværker suppleret af mere end 600 lokale kraft/varmeværker og ca. 6.000 vindmøller.

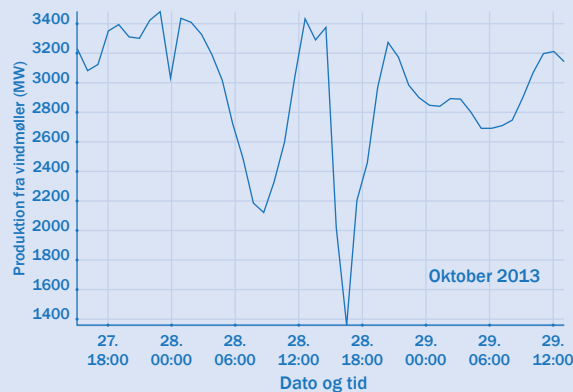
Uforudsigelig vindenergi



Figuren viser en af konsekvenserne af at have meget – og uforudsigelig – vindenergi i el-systemet, nemlig at prisen på el (de såkaldte spotpriser) kan variere meget og meget pludseligt. Den normale pris ligger omkring 30 euro/MWh, og figuren til venstre viser en situation fra juni 2013, hvor elprisen hoppede op til 2.000 euro/MWh pga. meget lav vindproduktion samtidig med, at der var meget lidt fri

kapacitet i transmissions-kablerne til vore nabolande. Omvendt droppede priserne kraftigt i juledagene, hvor et lavt strømforbrug pga. julen faldt sammen med en høj vindproduktion og stor produktion af el fra kraftvarmeværkerne, fordi vejret var koldt. Negative spotpriser betyder i realiteten, at producenterne af energi skal betale for at komme af med strømmen.

Endnu et eksempel på udfordringerne ved at integrere vindenergi i et el-system – produktionen af vind kan ændre sig meget pludseligt. Figuren viser vindproduktionen over 4 dage i oktober 2013, da oktober-stormen ramte Danmark, hvilket fik et stort antal vindmøller til at lukke ned. Resultatet var, at over et tidsrum på kun to timer faldt el-produktionen med mere end 2.000 MW (svarende til ca. 45 % af elforbruget).



Havvindmøller – her et foto af møllerne i vindmølleparken Rødsand 2

Foto: Colourbox



Forslag til videre læsning

Se hele Benjamin Biegels præsentation, som han rejser rundt i verden med: smartgriddennmark.com

Energistyrelsens energiscenarier for 2035 og 2050 (fra maj 2014). www.ens.dk/sites/ens.dk/files/undergrund-forsyning/el-naturgas-varmeforsyning/Energianalyser/nyeste/energiscenarier_-_analyse_2014_web.pdf

Styring af varmepumper som virtuelt kraftværk ing.dk/artikel/saadan-bliver-smaa-varmepumper-til-et-stort-virtuelt-kraftvaerk-168161

Klima-, Energi- og Bygningsministeriets Smart-Grid strategi <http://www.kebmin.dk/sites/kebmin.dk/files/klima-energi-bygningspolitik/dansk-klima-energi-bygningspolitik/energiforsyning-effektivitet/smart/smart%20grid-strategi%20web%20opslag.pdf>

Dansk Energi og Energinet.dk's Smart Grid 2.0 rapport www.danishenergyassociation.com/Theme/SmartGrid2.aspx

Nyeng, P. (2007): Fremtidens intelligente elsystem: Aktuell Naturvidenskab nr. 6. (Her kan man læse mere om elsystemets opbygning, om elpriser og om store strømafbrydelser).

Rent teknisk har man demonstreret, at det i dag er muligt at ændre en vindmølleparks elproduktion med 5-minutters interval. I det fremtidige danske smart grid kan det måske være ønskeligt, at vindmøllerne kan levere endnu hurtigere ydelser – fx på sekund-niveau, hvilket vil kræve ny teknologi for kommunikation og styring af vindmøllerne.

Transmission og lagring

Fleksibelt elforbrug og op- og nedregulering af produktionen af vindmøllestrøm har nogle naturlige begrænsninger. Man kan således ikke udskyde et forbrug af el i flere dage, men typisk kun i et antal timer, og at justere på vindproduktion kræver i sagens natur, at det blæser. For at få det fossilfrie 2050-puslespil til at gå op, må der yderligere nogle investeringer til på den lange bane.

En del af løsningen går ud på at udnytte den grønne biomasse bedre. Ved at omdanne biomasse til brint (H_2) kan vi få mere energi ud af biomassen. Gas er en god kilde til at balancere el-systemet, da gas kan bruges i gasturbiner, som hurtigt kan op- og nedregulere produktionen og dermed hjælpe med at kompensere for selv meget hurtige fluktuationer i systemet.

Man kan også berige denne gas (H_2) til methan (CH_4), som kan gemmes i vores eksisterende naturgasinfrastruktur. Det gør, at vi kan gemme store mængder gas over længere tid og bruge den, når vi har brug for den – fx hvis vi har en hel uge uden vind. Den danske gasinfrastruktur (inklusive gaslagre) er allerede betalt, og derfor er det meget attraktivt at udnytte det. Desuden er det interessant, at Energinet.dk, som er ansvarlig for systemstabilitet i det danske el-net, også ejer og driver gasnettet. Så det er oplagt at bruge denne synergi. Endelig kan man også udnytte gassen i transport-

sektoren. Alt i alt er der mange måder at bruge biomasse meget bedre på end bare at brænde det af i et kraftvarmeverk.

Derudover er det også vigtigt, at der er en tilstrækkelig kapacitet (dvs. tilstrækkeligt store elkabler) til at kunne udveksle energi med vore nabolande. Vore nabolande har et anderledes energimix (fx en stor del vandkraft i Norge og Sverige), og energi udveksles derfor mellem landene, når der er overskud/underskud af el. En vindfront vil også ramme lande på forskellige tidspunkter, og her kan en tilstrækkelig transmissionskapacitet hjælpe med at sende vindstrømmen derhen, hvor der er mest brug for den. I Danmark er vi allerede i gang med at udvide transmissionsforbindelserne til udlandet, og flere forbindelser er planlagt.

Når kulkraftværkerne udfases

Det er væsentligt i denne sammenhæng at nævne, at det er besluttet at udfase de konventionelle kraftværker, der er baseret på fossile brændstoffer, så det sidste danske kulkraftværk skal være lukket ned i år 2030. Flere værker er allerede lukkede eller omdannet til biomasse-kraftværker. Udfordringen ved det er, at vi så ikke længere har disse store kraftværker til at kunne levere store mængder strøm, når der akut er brug for det. De nye biomasse-anlæg kan for så vidt godt være store værker, men de er dyre i drift, fordi biomasse er dyrt, og derfor vil de kun operere i "peak hours" (dvs. når der er stort elforbrug eller lav vindproduktion og derved høje elpriser). I de timer, hvor værkerne ikke er i drift, er der altså brug for alternativer til at stabilisere systemet. Derfor er det interessant i stedet at mobilisere forbruget og regulere vindproduktionen til at levere sådanne balanceydelser – sådan som det er beskrevet ovenfor. Og alt peger på, at det faktisk vil kunne lade sig gøre. ■