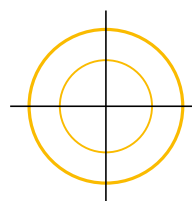


• Vladislav Akhmatov •



FYSIKUNDERVISNING
GYMNASIESKOLEN

elforsyning



Indhold

Forord	3
1. Introduktion	4
2. Elforsynings struktur, kvalitet og mål	5
2.1. Forsyningssikkerhed	5
2.2. Leveringskvalitet	6
2.3. El-sikkerhed	6
2.4. Økonomi	6
2.5. Kvoter og grænser for udslip	7
3. Fysiske begreber og enheder	8
3.1. Vekselsstrøm: Spænding, strøm og frekvens	9
3.2. Effekt	9
3.3. Energi	9
3.4. Modstand og tab	10
4. Elforbrug	11
4.1. Elbesparelser	12
5. Produktion af el	13
5.1. Elforsyning fra forbrugere til liberalisering	13
5.2. Kraftvarmeværker	14
5.3. Vindmøller	16
5.4. Havmølleparker	16
CASE Historien om Horns Rev 2 havmøllepark og strøm til Kolding	17
5.5. Decentrale anlæg	18
5.6. Energiselskaber	20
6. Elnettet	21
6.1. Højspænding, mellemspænding og lavspænding	22
6.2. Luftledninger og kabler	23
6.3. Transformatorer	24
6.4. Jævnstrømsforbindelser	25
6.5. Netselskaber og systemansvar	27
7. Elmarked og samtænkning af energisektorer	28
7.1. El-marked	28
7.2. Fleksibelt elforbrug	29
7.3. Samtænkning med transport- og varmesektorerne	29
8. Perspektivering: Fremtidens CO₂-frie elforsyning i Danmark	31

Tak til: Carsten Rasmussen · Karin Lomholt Finnemann

Kim Vedel Pedersen · Martin Schmidt

Særlig tak til: Preben Jørgensen

Sproglig redigering: Johanne Gabel

Projektkoordinering: Helle Kristiansen

Layout og opsætning: MONTAGEbureauet ApS

Repro og tryk: KLS Grafisk Hus

Udgiver: EnergyMinds, se www.energyminds.dk, juni 2010

ISBN: 978-87-91326-06-6

Forsidefoto: Palfoto





Forord

Målgruppen for undervisningshæftet 'Elforsyning' er primært gymnasieelever, der tager fysik på C- eller B-niveau i det almene gymnasium (STX) eller det tekniske gymnasium (HTX). Hæftet kan fint indgå som supplement til kernestoffet om energi og elektriske kredsløb eller selvstændigt i et valgfrit forløb.

Formålet er at præsentere elforsyningens basale fysik og betydning for samfundet. Elforsyning er desuden tværfaglighed i en nøddeskal og dermed et oplagt tema for undervisning, der hæfter fysikkens ender sammen med økonomi, det omgivende samfund og alle danskeres hverdag.

Fysiklærer Kim Vedel Pedersen har udarbejdet opgavehæftet 'Elforsyning – opgaver og cases', som indeholder en række opgaver og cases i tilknytning til dette undervisningshæfte.

Hæftet 'Elforsyning' er finansieret og skrevet på initiativ af projektet EnergyMinds. Flere mennesker med tilknytning til den danske elforsyning har på forskellig vis bidraget.

Undervisnings- og opgavehæftet kan downloades på www.energyminds.dk. Her kan man også bestille trykte eksemplarer af hæfterne, så længe oplaget rækker.

God fornøjelse med hæftet 'Elforsyning',

Vladislav Akhmatov
Forfatter

En vindmøllevinge bliver til...

Verdens største prøvestand for vindmøllevinger er placeret hos LM Wind Power i Lunderskov. Her kan vinger på op til 80 meter testes ved hjælp af avancerede testmetoder.

Foto: LM Wind Power



Introduktion

Når du taler i mobiltelefon, ser fjernsyn eller laver kaffe om morgenen, bruger du elektrisk energi fra elforsyningen. For dig og de andre godt tre millioner forbrugere af elforsyningen i Danmark er el en vare, som vi stort set tager for givet. Strømafbrudelser hører efterhånden absolut til sjældenhederne.

Bag den sikre forvisning om at der er strøm i kontakten, står en elforsyning, som producerer og leverer elektrisk energi til alle forbrugere. Fra de mindste husstande til de største virksomheder og samfuntsfunktioner som for eksempel togdrift og gadebelysning. Pålidelig elforsyning er uundværlig for det moderne samfunds dynamik og infrastruktur – både teknisk, socialt og økonomisk.

Elektrisk energi bliver produceret af store centrale kraftvarmeværker, vindmøller og vindmølleparker, decentrale kraftvarmeværker, solceller m.m. og bliver leveret til forbrugerne via elnettet. Forbrugernes behov styrer hvor meget energi, der bliver produceret og leveret. Elnettet sørger for at binde produktion og forbrug sammen. Det er med andre ord motorveje, lande- og biveje for elektrisk energi.

Grøn revolution

Elforsyningen er midt i en grøn teknologisk revolution. Den velkendte og afprøvede teknologi til drift og regulering af store kraftvarmeværker viger pladsen for teknologi til vindkraft og anden vedvarende energi. I Danmark spiller vindkraften den største rolle i omstillingen. Men solceller og bølgeenergianlæg er også lige på trapperne.

Udbygning med vindkraft i Danmark sker fremover mest med store havmølleparker, der tæller hundredvis af avancerede vindmøller. Danmark har allerede flere store havmølleparker ved eksempelvis Horns Rev, Nysted, Samsø og Middelgrunden/København, og flere er på vej.



Kontrolrummet hos Energinet.dk

1.1

Virkelighedens vindkraft overgår forventningerne

I 1990'erne mente man ikke, at et elektrisk energisystem kunne kapere mere end 10 procent vindkraft i den samlede produktionskapacitet. Men vindmølle-teknologiens udvikling og integrationen af vindkraft i Danmark betød, at allerede i starten af 2000-tallet leverede vindmøllerne i snit cirka 20 procent af den elektriske energi om året. Danmarks politiske mål er at øge produktionen af vedvarende energi til 50 procent. Midlet er primært mere vindkraft, som skal levere 30 procent af den forbrugte elektriske energi inden år 2025. Udviklingen harmonerer med et folkeligt og politisk ønske om et bedre klima, reduktion af CO₂-udslippet, opbremsning af den globale opvarmning og en elforsyning, der er uafhængig af fossile brændsler.

Energi som vinden blæser

Foto: Nysted Havmøllepark

Vinden varierer meget i styrke, og det blæser ikke altid, når forbrugerne har brug for strøm. Derfor kræver det nytænkning på tværs af energisektorerne, hvis vi skal bevare pålidelig og rentabel elforsyning baseret på en energiproduktion, som i stadig højere grad er styret af vind og vejr.



2

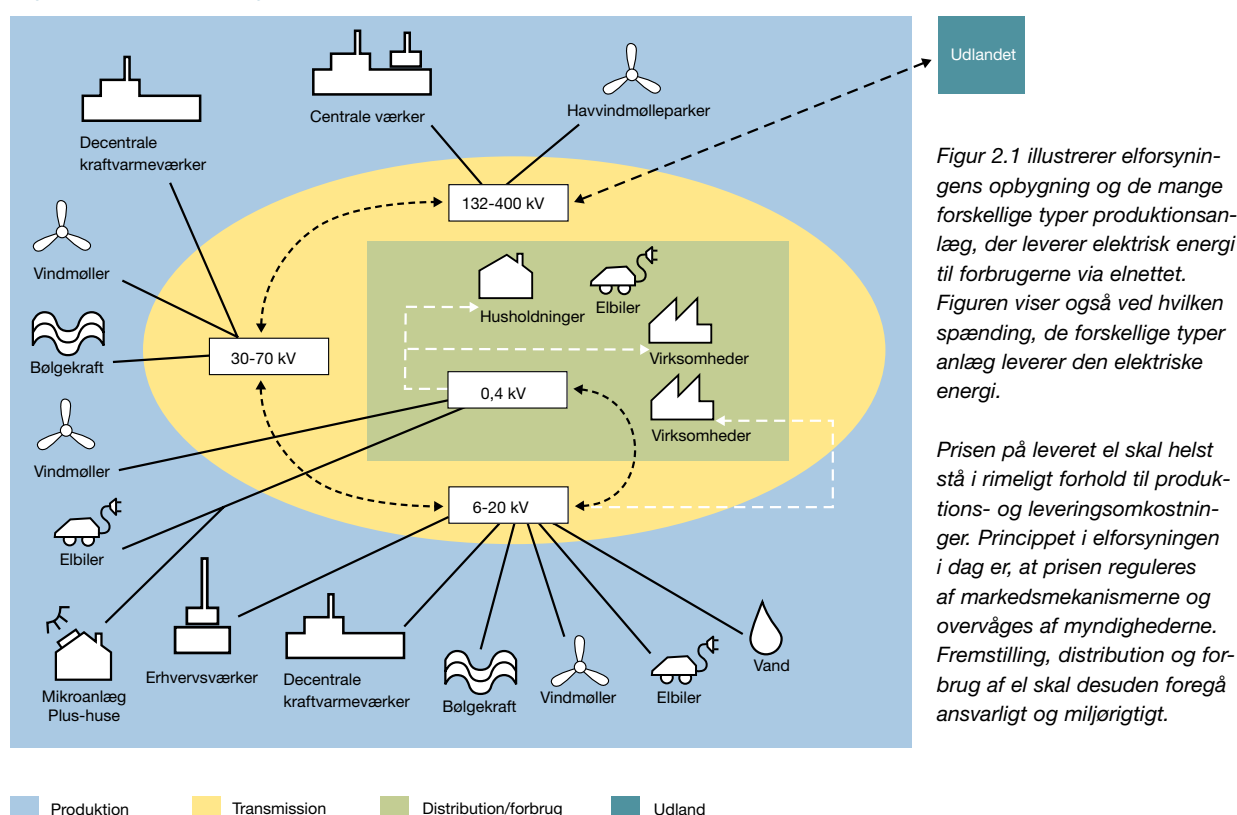
Elforsyningsens struktur, kvalitet og mål

Et tryk på stikkontakten indebærer ikke bare en forventning om, at der skal være strøm. Det er også en selvfølge, at strømmen har den rigtige frekvens og spænding til computer, tv og vaskemaskine. Det siger også sig selv, at ingen skal komme til skade ved at arbejde med elforsyning...

...Når elregningen kommer, skal tallene for forbrug og afregning være korrekte og priserne rimelige. Sidst men ikke mindst ser vi helst, at det hele foregår uden CO₂-udslip og andre skadelige miljøpåvirkninger.

ger. For at leve op til alle forventningerne er elforsyning underlagt krav til forsyningssikkerhed, el-sikkerhed, strømkvalitet, økonomi, miljø og CO₂-kvoter.

Figur 2.1: Elforsyning i Danmark



2.1 Fejl i nettet

Fejl og uregelmæssigheder er uundgåelige i et elektrisk energisystem. Det sker for eksempel under lynnedslag i en elmast, eller når islag lægger sig på luftledninger som derved kommer i svingninger på grund af vind og kortslutter ved berøring. Elselskabernes opgave er at minimere antallet af fejl og konsekvenserne af dem, så det ikke fører til strømafbrydelser hos forbrugeren. Elsystemet i Danmark er gennem årtier blevet bygget sådan op, at forsyningssikkerheden er meget høj og kun sjældent giver strømafbrydelser.

2.1 Forsyningssikkerhed

Forsyningssikkerhed betyder lidt forenklet, at der altid er strøm i stikkontakten hos forbrugeren, også selv om der er fejl og uregelmæssigheder i elsystemet.

Når elsystemet fungerer normalt og uden fejl, kaldes det normaldrift. Forbrugerne oplever normaldrift som en hverdag med strøm i stikkontakten.

2.2 Leveringskvalitet

Strømmens spænding og frekvens skal holde sig inden for nogle faste tolerancer. Hvis spænding og frekvens har for store udsving, forstyrrer det nemlig de digitale elapparater i husholdningerne, som eksempelvis vaskemaskine, tørretumbler, opvaskemaskine og computer, ligesom tv og radio også bliver sendt og modtaget digitalt. I virksomheder og på kontorer er der også mange processor- og computerstyrede maskiner.

Udsving og afvigelser i spændingen eller frekvensen kan forkorte apparaternes levetid.



2.3 El-sikkerhed

Begrebet el-sikkerhed betyder, at mennesker ikke kommer til skade, når de arbejder med eller bruger elektrisk energi. Det gælder såvel en elmontør, der reparerer elnettet, som en it-specialist, der bruger en computer.

Først og fremmest betyder el-sikkerhed, at elektriske apparater og komponenter skal overholde krav til isolering, som skal forhindre overslag mellem metaldele og kortslutninger, der giver risiko for personskader.

Højere spændinger kræver større isolationsafstand, altså tykkere isolering, end lavere spændingsniveauer. Den tykkere isolering er dyrere og mere kompleks end isolering til lavere spændinger.

2.4 Økonomi

Elforsyningen er blandt de vigtigste forudsætninger for et moderne samfund. Ikke mindst for at økonomien fungerer. Derfor har både beslutningstagere, myndigheder og elforbrugere interesse i, at der er økonomi til at drive, udbygge og vedligeholde elforsyningen.

I Danmark er der forskellige økonomiske rammer for de selskaber, der leverer el via elnettet og de selskaber, der producerer og sælger el.

Elselskaber, der står for transport og levering af elektrisk energi via elnettet, er underlagt økonomiske rammebetingelser. Samme selskaber står ofte også for at drive og vedligeholde elnettet og kaldes netselskaber. Denne del af elforsyningen bliver i princippet drevet som monopoler.



2.2 El på markedsvilkår

De selskaber, som producerer el, sælger produktionen på markedsvilkår og via el-børser, som for eksempel Nord Pool. På el-børserne bliver pris og mængde fastlagt ud fra udbud og efterspørgsel. Markedsmekanismerne påvirker altså priserne, som igen påvirker produktionsmønster, omsætning og fortjeneste for de selskaber, der ejer produktionsanlæggene. Prisniveauet overvåges af konkurrencemyndighederne, der skal sikre sig, at markedet fungerer til gavn for forbrugerne.

Foto: DONG Energy

2.3 Samtænkning som middel mod drivhuseffekt

Der er en bred videnskabelig, politisk og folkelig enighed om, at det menneskeskabte udslip af blandt andet CO₂ giver drivhuseffekt. CO₂, metan og andre stoffer giver et varmeisolerende lag i atmosfæren, der holder på den varme, som jorden får fra solen. Det bidrager til ørkenspredning, afsmeltning af indlandsisen og vandstandsstigning i havene. Alt sammen med miljø- og menneskelige katastrofer til følge. Størstedelen af den menneskeskabte CO₂-udledning stammer fra afbrænding af fossile

brændsler som kul og olie til fremstilling af elektrisk energi og varme. Derudover kommer en stor del fra transport og industri. Derfor er vi i Danmark begyndt at se på løsninger, der minimerer CO₂-udslip. Blandt andet ser vi på, hvordan el-, varme- og transportsektorerne griber ind i hinanden, og hvordan sektorerne kan producere, levere og forbruge hinandens energi på en måde, der minimerer udslip. Det kaldes for samtænkning af energisektorerne.

2.5 Kvoter og grænser for udslip

I Danmark er der miljøkrav til at bygge, drive, vedligeholde og nedlægge elektriske anlæg. Der er grænser og kvoter for udslip af miljøskadelige gasser og stoffer fra produktion og distribution af el. Dette gælder udslip af CO₂ (kuldioxid), NO_x (kvælstofforbindelser), SO₂ (svovldioxid) og andre gasser, partikler og affaldsprodukter.

Miljøregnskab

Elselskaberne skal lave miljøregnskaber til myndighederne. I miljøregnskabet står der, hvor meget energiproduktion og distribution udleder af diverse stoffer, og hvilke andre miljøpåvirkninger, det giver.

Mere grøn el på vej

Der kommer mere og mere grøn elproduktion i Danmark, især med flere vindmøller. Men også ved at bruge biomasse frem for kul og olie til at fremstille el og varme. I 2010 er regeringens energipolitiske mål, at vindkraften inden 2025 skal udgøre halvdelen af al dansk produktionskapacitet og levere 30 procent af vores strøm om året. Derudover skal flere solceller, mere bølgekraft, biobrændsel og CO₂-neutralt brændstof (primært fra planter) give miljøvenlig og bæredygtig elforsyning i Danmark.



Afsvovlningsanlæg på Asnæsværket

Foto: DONG Energy

3

Fysiske begreber og enheder

Fysik, formler og enheder er helt nødvendige i elforsyningen. I sidste ende for at du kan få en regning, der stemmer i kilowatt-timer, kroner og øre. Men også som udgangspunkt for overhovedet at producere, levere, sammenligne og måle den elektriske energi.

Fysiske begreber og enheder er forudsætninger for at måle, sammenligne og afregne leveringen af elektrisk energi fra producenterne til forbrugerne. Det er også nødvendigt for at måle energiudveksling og tab i elnettet, specificere elektrisk design i forhold til kravene og sammenligne forskellige elapparaters kvalitet og egenskaber.

Blandt de vigtigste fysiske begreber er: elektrisk spænding, strøm, modstand, effekt og energi og frekvens. Desuden skelner man mellem vekselstrøm og jævnstrøm, *jf. afsnit 6*.

Système International (SI)

Begreberne og deres (måle)enheder er samlet i *tabel 3.1*. De vigtigste bliver forklaret nedenfor. Enhederne bliver opgivet i såkaldte SI-enheder. SI betyder "Système International" og er en standardisering af enheder. Standardiseringen giver et ensartet grundlag for at måle, sammenligne og afregne el samt sammenkoble elektriske energisystemer på tværs af regioner og landegrænser.

I nogle sammenhænge er de grundlæggende SI-enheder for små. Derfor bruger man tillægsbetegnelser som kilo = 10^3 , mega = 10^6 , giga = 10^9 og tera = 10^{12} . Der er også forskel på, om enhederne skal bruges i private husstande eller i store elsystemer.

Tabel 3.1: Fysiske begreber og enheder i elforsyning

Begreb	Betegnelse	SI-enhed	Husstand	Energisystem
Spænding	U	volt	volt (V)	kilovolt (kV)
Strøm	I	ampere	ampere (A)	kiloampere (kA)
Modstand	R	ohm	ohm (Ω)	ohm (Ω)
Effekt	P	watt	watt (W)	megawatt, gigawatt (MW, GW)
Energi	E	watt-time	kilowatt-time (kWh)	terawatt-time (TWh)
Frekvens	f	hertz	hertz (Hz)	hertz (Hz)

Spænding, strøm og frekvens er grundlæggende begreber. Effekt, energi og modstand er deres afledte. Frekvens defineres kun i systemer med vekselstrøm.



3.1

SI-enhed for energi

SI-enheden for energi er 1 joule, hvor 1 joule er 1 watt multipliceret med 1 sekund. I elforsyningen bruger man watt-timer med tilføjelser, der starter med kilo og opad for at lette afregning af leveret og overført energi. 1 kilowatt-time svarer til 3,6 megajoule.

Foto: Colourbox

3.1 Vekselstrøm: Spænding, strøm og frekvens

Vekselstrøm betyder, at spændingen og strømmen varierer som en pæn sinus-funktion over tid, som vist i *Figur 3.1*.

Frekvens

Frekvens betegner, hvor mange gange spænding og strøm ændrer retning i løbet af et sekund. Det europæiske elektriske system har en frekvens på 50 hertz. Det betyder, at spænding og strøm gennemløber en periode 50 gange hvert sekund. Man kan også sige, at spænding og strøm ændrer retning 100 gange i sekundet, nemlig to gange per periode. Frekvensens størrelse hænger sammen med, hvor hurtigt generatorerne på de store kraftvarmeværker og i vindmøllerne roterer for at give elektrisk spænding og strøm.

3.2 Effekt

Til et givet tidspunkt t udregnes øjeblikseffekten $P(t)$ til tiden t som produktet af spænding $U(t)$ og strøm $I(t)$:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (3.1)$$

3.3 Energi

Den nyttiggjorte energi E defineres som summen af den nyttiggjorte effekt $P(t)$ over et tidsinterval Δt :

$$E(t) = P(t) \cdot t \quad (3.2)$$

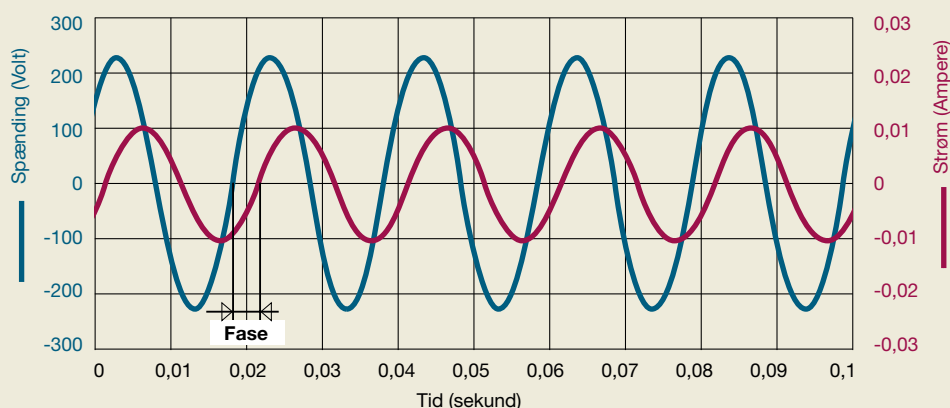


Foto: DONG Energy

3.2 Volt, ampere og hertz derhjemme

Spænding, strøm og frekvens er hele tiden på spil i vores hjem. For eksempel bliver computeren forsynet med en bestemt spænding (målt i volt), strøm (målt i ampere), og frekvens (målt i hertz). Den elektriske spænding hjemme i stikkontakten er normalt 230 volt og frekvensen 50 hertz. Det står også på computerens strømforsyning. De forskellige husholdningsapparater kræver en konstant elektrisk spænding og frekvens. Strømstyrken kan derimod være forskellig fra et apparat til et andet. Det vil sige, at de ikke trækker samme elektrisk strøm. Derfor har de forskelligt energiforbrug.

Figur 3.1 Spænding og strøm varierer over tid



Der er en tidsmæssig forskydning mellem spænding og strøm, og den betegnes fase-forskydningen.



Fotos: Lars Grunwald



3.3 Tab er aldrig nul

Tab kan aldrig blive nul, fordi der altid er de såkaldte resistive tab. Altså en varmeudvikling der skyldes den elektriske modstand i ledninger, generatorer, forbrugsapparater og andre elektriske komponenter. Elektrisk modstand er temperaturafhængig og stiger, når temperaturen stiger. Det gør tab også.

3.4 Modstand og tab

Elektrisk modstand R af en elektrisk komponent defineres ud fra den overførte strøm I og det resulterende spændingsfald U over den elektriske komponent:

$$U = R \cdot I \quad (3.3)$$

Spændingsfaldet U er netop differencen mellem de to spændinger, der måles i hver ende af komponenten.

Det afsatte effekttab P_T i komponenten defineres som produktet af spændingsfaldet over komponenten og strømstyrken gennem komponenten.

$$P_T(t) = U(t) \cdot I(t) = R \cdot I(t)^2 \quad (3.4)$$

Effekttabet er normalt forbundet med varmeudvikling og måles ligesom elektrisk effekt i watt.

Årsregning - Energiforbrug	
inkl. 1. a conto	
Kundens nr.:	19 - 19 0038 033
BS-kundens nr.:	021019003803300
Fakturans nr.:	2006-138.646
Fakturadato:	14.06.2006
Ålægningsperiode: 01.06.2005 - 31.05.2006	
Forbrug	I alt
91 m³	91 m³
4519 kWh	4519 kWh
Opførelse af betaling	
Altæsnings	
Dato	Altæsnings
31.05.06	1341
31.05.06	55717
1.226,51	
6.125,49	
2.034,05	
9.386,05	
-8.640,00	
746,05	
2.570,00	
3.316,05	

3.4 Forbruget på elregningen

Energiforbruget udregnes af elmåleren efter princippet i [udtryk \(3.2\)](#). Det giver grundlag for afregning mellem husstanden og energiselskabet. Det giver også grundlag for sammenligning og energimærkning af elektriske apparater. Forbruget i husstanden for samtlige elektriske apparater afregnes i kilowatt-time (kWh). Det samlede forbrug står på elregningen fra energiselskabet.

4

Elforbrug

Det er forbrugerne, der bestemmer, hvornår der skal produceres el. El kan nemlig ikke lægges på lager i store mængder – endnu. Derfor følger elproduktionen vores forbrug i løbet af døgnet og året. Målet er, at vi skal reducere vores elforbrug og dermed brugen af fossile brændsler, som påvirker miljøet. Alligevel vil det samlede elforbrug sandsynligvis stige i fremtiden, fordi el skal bruges til andre formål i samfundet – eksempelvis erstatte benzin til biler.

Elforbrugere er alle, der bruger strøm. Det gælder private husstande, gadebelysning, kontorer, forretninger, virksomheder, private og offentlige institutioner.

Elforbrug følger årstider og døgnrytmer

Figur 4.1 illustrerer elforbrug i Danmark over to 2-døgnperioder i henholdsvis vinter- og sommermåneder. Forbruget er størst om vinteren. Vi bruger mere el til belysning og opvarmning på en kort, mørk og kold vinterdag end på en lang, solrig og varm sommerdag.

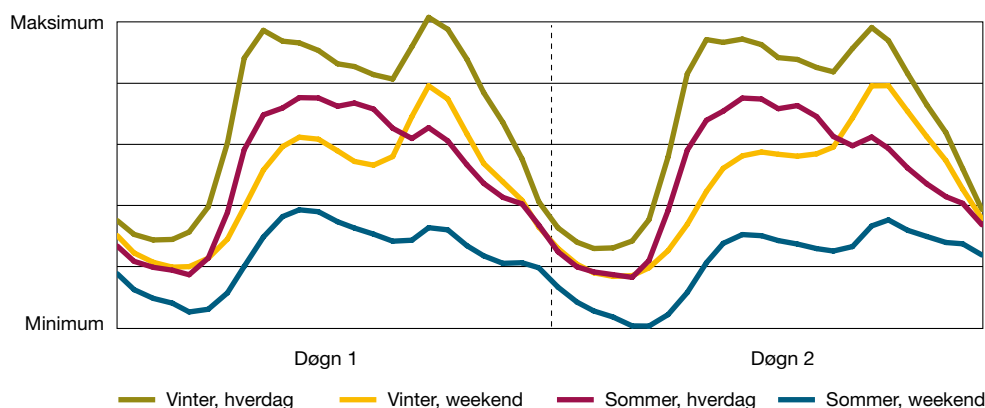
Forbruget er altså sæsonafhængigt, ligesom det varierer i løbet af døgnet i takt med aktiviteterne i hjem, industri og institutioner. Forbruget er størst midt på dagen, når vi er vågne og aktive, og dalende om natten,

når vi sover. Omkring aftensmåltiderne er der en såkaldt ”kogespid”. Forbruget er også større på hverdage end i weekender, fordi industri og institutioner bruger strøm. Med andre ord følger forbruget døgnrytmen hos mennesker.

Forbruget er også større på hverdage end i weekender, fordi industri og institutioner bruger strøm. Med andre ord følger forbruget døgnrytmen hos mennesker.

Produktionen følger forbruget

Der er endnu ikke fundet en rigtig god måde at lagre elektricitet på. Derfor følger produktionen – primært på de centrale anlæg – hele tiden det aktuelle elforbrug. Mere vedvarende energi, aktivt forbrug og flere mikroanlæg i private husstande vil gradvis ændre produktions- og forbrugsmønstre, som vi kender dem i dag, jf. afsnit 5 og afsnit 7.



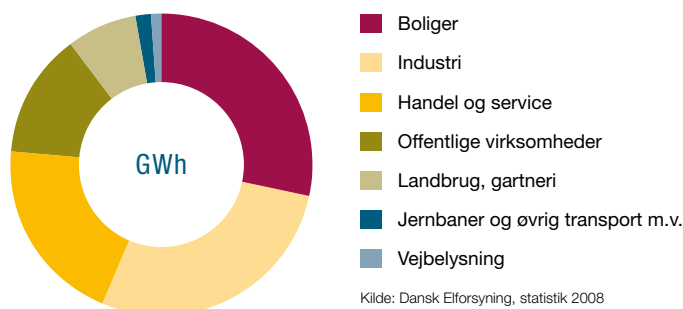
Figur 4.1: Samlet elforbrug i Danmark

Maksimum og minimum er på cirka 6.500 megawatt og 2.300 megawatt.



Figur 4.2

Elforbruget fordelt på sektorer

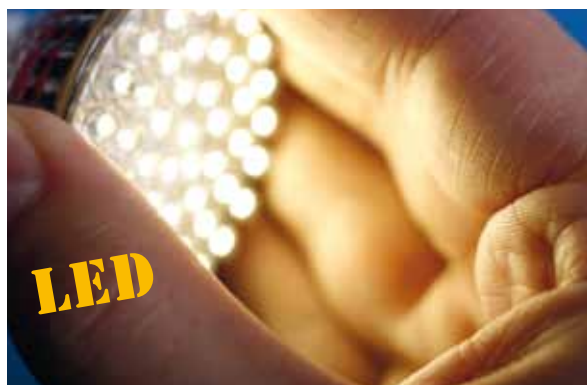


Kilde: Dansk Elforsyning, statistik 2008

4.1. Elbesparelser

Elbesparelser er en af måderne, vi kan gøre os mindre afhængige af fossile brændsler og undgå miljøpåvirkninger på. Der er mange veje til elbesparelser. For eksempel kan man bruge energibesparende processer og teknologier i industrien, husholdningerne kan bruge energieffektive husholdningsapparater, som vælges på baggrund af retvisende energimærkning og forbrugerinformation, og energieffektive lyskilder giver i sig selv store besparelser i elforbruget (se boks 4.1).

Elforbruget i private danske husstande vil alt andet lige falde i takt med udbredelsen af mere energieffektive apparater og belysning. Alligevel kan det samlede elforbrug sagtens stige, fordi el vil blive brugt i stedet for fossile brændsler til transport og varmeproduktion, *jf. afsnit 7.*



Fotos: Osram (øverst) / iStockphoto

4.1

Farvel til glødepæren

En glødepære bruger cirka 10 procent af den tilførte elektriske energi til lys. De resterende 90 procent er spild i form af varmetab. Fra 2012 er det ikke længere muligt at købe en glødepære i hele EU. 100 watts glødepærer er allerede forsvundet fra butikkerne, og fra 2010 er det slut med 60 watts glødepærer. Formålet er, at glødepærene gradvist bliver erstattet af mere energieffektive lyskilder, som lysdioder, også kaldet LED (Light Emitting Diode), halogenlamper og sparepærer. Overgangen til de mere energieffektive lyskilder vil, ifølge beregningerne, reducere elforbruget i hele EU med hvad, der svarer til 11 mio. europæiske husholdningers elforbrug.

5

Produktion af el

De store kraftvarmeværker producerer sammen med vindmøllerne langt den største del af danskernes el. Men decentrale anlæg, som eksempelvis mindre kraftvarmeværker, og mikroanlæg hjemme hos forbrugerne bidrager også i stor stil. Kul er stadig den største kilde til energi-fremstilling, men bliver efterhånden erstattet af vind og biomasse – fremover også af sol og bølger.

I Danmark bliver el produceret på forskellige slags anlæg. Lige fra centrale kraftvarmeværker på hundrede megawatt installeret produktionskapacitet til ganske små, forbrugerejede anlæg på få hundrede kilowatt. Også små mikroanlæg på få kilowatt, der typisk er i private husstande, tæller med. Kilderne til elproduktion er

blandt andet: Kul, naturgas, olie, affald, bioenergi, bølgekraft, sol, vind og vandkraft. I Danmark fremstilles el på: Centrale kraftvarmeværker, vandkraftværker, decentrale kraftvarmeværker, vindmøller, solceller, brændselsceller og bølgeenergianlæg.

5.1. Elforsyning fra forbrugereje til liberalisering

Dansk elforsyning er traditionelt ejet af elforbrugerne selv. Det skyldes, at kablerne ud til hver enkelt husholdning i sin tid er lagt af over tusinde små forbrugerejede transformerforeninger og 500 lokale elværker. De er siden svundet ind til i 1970 kun at tælle 20 kraftværker. Men en del af de mange elværker fra førkrigstiden fortsatte som rene netselskaber ejet af forbrugerne i andelsselskaber eller som kommunale selskaber. Netselskaberne ejede så igen de større regionale kraftværker.

Væk fra olien

Centraliseringen af elproduktionen skyldtes, at de tidlige tiders mange små elværker producerede på importeret olie. Under 2. verdenskrig svandt den import ind, og danskerne mærkede for første gang, at en olieafhængig elforsyning er meget sårbar. Derfor var der behov for større dampkraftværker, der kunne producere på kul eller indenlandske brændsler som brunkul og tørv. Efter krigen gik værkerne dog tilbage til den billige og let håndterbare olie.

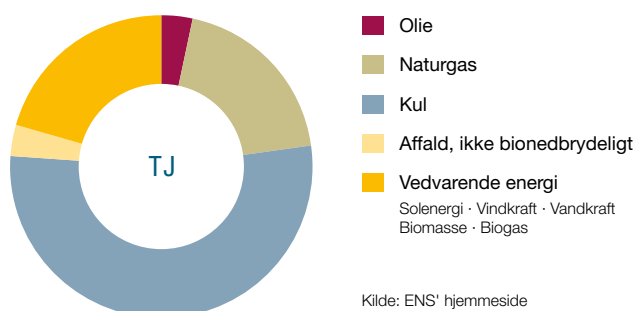
Staten på banen

Udvikling ansporet af olieafhængighed slog derfor til for anden gang under og efter oliekrisen i 1973. Værkerne omlagde igen til kul, og krisen skabte for første gang opbakning til, at staten blandede sig i elforsyningen. Den brede befolkning fik nemlig øje for betydningen af forsyningssikkerhed, uafhængighed og siden også for miljøpåvirkning.

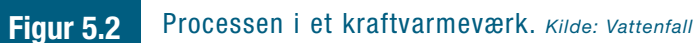
Hvile-i-sig-selv-princippet

Det betød for det første, at elproduktion blev underlagt regeringens tilsyn i den nyoprettede Energistyrelse, og at et statsligt Elprisudvalg (fra 2000 Energitilsynet) overvågede, at elskaberne økonomisk hvilede i sig selv. Det vil sige, at selskaberne ikke tjente penge på salg og distribution af el men udelukkende fik dækket omkostninger og afgifter ind via elprisen. >>>

Figur 5.1 Elproduktionens fordeling på energikilder



FOSSILE
BRÆNDSLER



- ## Vindmøllernes indtog

Liberalisering

5.2. Kraftvarmeværker

Figur 5.2 viser, hvordan forbrændingen i et kraftvarmeværk giver både el og varme.

De danske centrale kraftvarmeverker er Asnæsværket, Stigsnæsværket, Avedøreværket, Amagerværket, Kyndbyværket, Svanemølleværket og H.C. Ørstedværket på Sjælland, Fynsværket (ved Odense) på Fyn, Nordjyllandsværket (ved Aalborg), Studstrupværket (ved Århus), Esbjergværket (ved Esbjerg) samt Skærbækværket og Enstedsværket i Sydjylland.

#5.1 Verdensrekord i virkningsgrad

49%

14

5.2

Biomasse i stedet for kul



Fotos: Vattenfall

Tidligere benyttede de centrale kraftvarmeværker næsten udelukkende kul som brændsel. Men efterhånden benytter flere kraftvarmeværker naturgas eller forskellige former for biomasse. Flere produktionsenheder på de danske kraftvarmeværker er ombygget eller godt på vej til at blive ombygget til at benytte biomasse i stedet for kul.

5.3

Lagring af CO₂

Teknologi til at opsamle og lagre CO₂ er under udvikling. Idéen er at rense CO₂ af røggassen, komprimere gassen til væske og lagre den i undergrunden i passende geologiske formationer. Teknologien er tiltænkt kraftvarmeværkerne så de kan reducere og muligvis helt undgå CO₂-udledning fra de kulfyrede kraftvarmeværker.

BIO MASSE



Tæt ved havne og byer

Kraftvarmeværkerne er traditionelt placeret ved havne for at have nem og stabil levering af kul og olie og for at have adgang til havvand til køling.

Værkerne ligger desuden i nærheden af storbyer, hvor der er tilstrækkeligt mange bygninger og boliger til at aftage varmen fra elproduktionen. Den bynære placering har medført miljøkrav til produktion på de store kraftvarmeværker, herunder krav om mekaniske filtre og kemiske gas- og partikelfiltre, samt reduktion af CO₂ udledning.

Balancering af produktion og forbrug

Elektricitet kan ikke lagres i store mængder. Derfor skal produktion i tid og mængde svare til forbruget, for at elsystemet kan fungere. Tilpasning af produktionen til forbruget kaldes balancering. Begrebet er både statisk og dynamisk. Statisk fordi det kræver, at der er produktionskapacitet nok til at dække hele forbruget. Dynamisk fordi energileverancerne over tid nøjagtigt skal tilpasses variationen i forbruget.

Balancering foregår ved, at de centrale (termiske) anlæg kompenserer for naturlige udsving i elproduktionen fra vindmøller og uforudsete variationer i forbruget. Anlæggene øger eller holder igen på produktionen (regulærkraft) alt efter, om der er underskud eller overskud af el i systemet. På de centrale kraftvarmeværker kan det lade sig gøre ved at regulere brændselstilførslen og derved trykket på turbinerne, der driver generatorerne.

Synkrongeneratorer

Elektrisk energiproduktion på de store kraftvarmeværker foregår ved at bruge såkaldte synkrongeneratorer. Synkrongeneratorerne reguleres sådan, at hele det elektriske energisystem samlet set kører i takt. Frekvensen i elnettet, 50 hertz i det europæiske system, bestemmes af synkrongeneratorernes rotation. Selve benævnelsen "synkrongenerator" henviser til synkroniseret, altså i-takt, drift af elnettet.

5.4

Centrale kraftvarmeværkers systemtjenester



Trods den massive tilgang af vindkraft og decentrale kraftvarmeværker kan de store centrale kraftvarmeværker ikke undværes. Udover at levere el og varme har de store kraftvarmeværker vigtige funktioner for elsystemet. Det drejer sig om at fastholde spænding og frekvens på et givet niveau (forsyningskvalitet), kompenserer for udfald af andre produktionsenheder uden at forbrugere mærker noget til det og om at balancere produktion og forbrug i perioder med svag vind eller stærkt varierende vindforhold (forsyningssikkerhed). Disse funktioner hedder systemtjenester. Flere store centrale kraftvarmeværker er derfor i drift hele tiden, også når der er stærk vind. Efterhånden kan havmølleparker levere flere og flere af systemtjenesterne. Men det kræver, at det blæser.

5.3. Vindmøller

Elektricitetsproducerende vindmøller er anlæg, der omdanner vindens kinetiske energi til elektrisk energi. Der er flere designtyper, som adskiller sig fra hinanden på parametre som udformning af tårne og vinger, generatorer og reguleringer.

Vindkraftens ubalancer er største udfordring

De vindmøller og havmølleparker, der udvikles og opstilles i dag og i fremtiden, er state-of-the-art produktionsanlæg, hvis evner til levering af systemtjenester nærmer sig de centrale kraftvarmeværker men kræver, at der er vind. Svagheden ved vindkraft er den naturlige vindvariation. Vindmøllerne kan skrue ned for elproduktionen, når der er for meget vind i forhold til forbruget. Men når der er vindstille, kan vindmøllerne af naturlige årsager ikke fremstille el, selvom der er et stort forbrugsbehov.

Vindstyrken kan ændre sig meget pludseligt, så produktionen fra vindmøller svinger mellem maksimum og næsten ingenting. *Figur 5.3* viser målt elproduktion i Vestdanmark over en uge med store udsving. Når forbruget samtidig er som vist med den røde kurve i *figur 5.3*, giver det betydelige ubalancer.

Ubalancer på grund af vindvariationer er blandt de største tekniske udfordringer ved at integrere stadig mere vindkraft i elforsyningen, jf. historien om Horns Rev 2 på næste side.



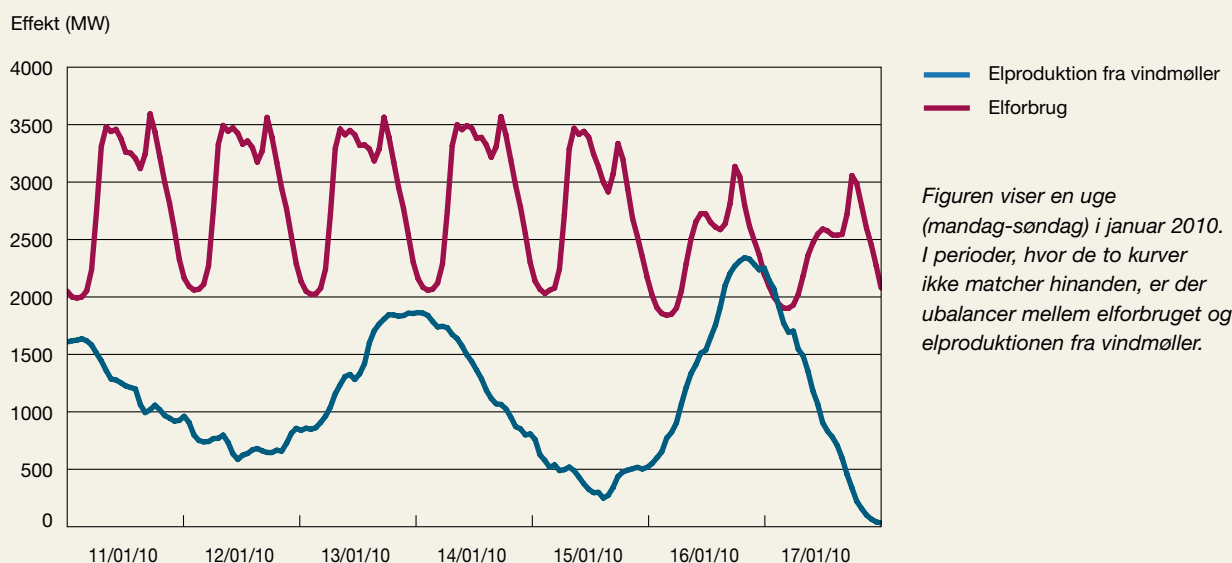
Foto: Photosearch

5.4. Havmølleparker

Vindmøllerne på havet bliver rejst i store havmølleparker med op til flere hundrede vindmøller. Møllerne i en havmøllepark udgør et samlet produktionsanlæg og bliver

reguleret som sådan. *Figur 5.4* viser den eksisterende og potentielle udbygning med havbaseret vindkraft i Danmark. Ved at anvende flere megawatt store vindmøller kommer havmølleparkerne op på flere hundrede – endda over et tusind megawatt installeret produktionskapacitet pr. park.

Figur 5.3 Elproduktion fra vindmøller i Vestdanmark i forhold til elforbruget i Vestdanmark





HISTORIEN OM Horns Rev 2 havmøllepark og strøm til Kolding

Horns Rev 2 havmøllepark er en stor dansk vindmøllepark, som ligger 30 km fra den jyske vestkyst i den danske del af Nordsøen. Havmølleparken blev indviet i 2009. Den består af 91 store vindmøller fra Siemens Wind Power, ejes af DONG Energy og er blandt de største i Danmark. I snit producerer parken årligt strøm svarende til årsforbruget i 200.000 husstande eller til det samlede årlige elforbrug i en større by som for eksempel Kolding (el til boliger, industri, handel og service m.v.).

Lad os i et tankeeksperiment isolere Horns Rev 2 havmøllepark og elforbruget i Kolding fra resten af Danmarks elforsyning.

Produktionen fra havmølleparken følger den naturlige variation i vinden. Der er perioder med meget vind, og dermed meget el, samt perioder med lidt vind, hvilket giver lidt elproduktion. I store havmølleparker kan elproduktionen svinge hurtigere end på land, fordi mange store vindmøller opstilles på et relativt lille areal – altså vindvariationen opleves (næsten) samtidigt af alle vindmøller i parken.

Elforbruget i Kolding følger derimod sin egen rytme. Der bliver brugt meget strøm om dagen, hvor folk er vågne og aktive. Om natten, hvor folk sover, bliver der til gengæld ikke brugt særlig meget strøm. Produktionsmønsteret i havmølleparken, styret af vind og vejr, passer ikke nødvendigvis med forbrugsmønsteret, styret af aktiviteter og behov.

Endnu kan vi ikke oplagre elektrisk energi i tilstrækkelig store mængder til at udjævne perioder med over-

skud eller underskud af el. Hvis Horns Rev 2 alene skulle forsyne Kolding med el, ville der gå vindmøllestrøm til spilde i perioder med for meget vind. Til gengæld ville der mangle strøm i perioder med vindstille og for lidt el. Energispild er både økonomisk og miljømæssigt uansvarligt. Og strømbegrænsninger, hvad enten det er vilkårlige strømafbrydelser eller rationeringer, er helt utænkelige i et velfungerende samfund.

Løsningen må være, at produktion og levering af el skal kunne indrette sig på forbrugerne. Det kaldes balancering af produktion og forbrug. Når Horns Rev 2 har overskud af el i forhold til behovet i Kolding, er der andre forbrugere i Danmark eller udlandet, der har brug for strømmen. Omvendt, når parken producerer for lidt el til forbruget i Kolding, må forbrugerne få el fra andre kraftvarmeværker eller havmølleparker med eloverskud. Balanceringen foregår blandt andet ved at kompensere elproduktionen på de centrale kraftvarmeværker, ved handel med el på elbørser og indkøb eller salg af el til udlandet.

Horns Rev 2 havmøllepark

En havmøllepark bliver til

Da Horns Rev 2 står færdig i november 2009 er den verdens største havmøllepark bestående af 91 møller og egen transformestation og beboelsesplatform ude på havet. Fra transformatorplatformen ledes den producerede strøm ind til land via et 42 km langt søkabel.

Parken står vest for Blåvands Huk med 30 kilometer til den jyske vestkyst.

Byggeriet forløb over 18 måneder og over 600 mennesker og 25 fartøjer var involveret i opførelsen.

Vindmøllerne er over 100 meter høje og fundamenterne er banket 30-40 meter ned i havbunden.

Vanddybden er 9-17 meter. Alle mølleledene blev transporteret til Esbjerg, hvor møllerne blev samlet, før de blev sejlet ud på revet til installation.



Fotos: DONG Energy

5.5. Decentrale anlæg

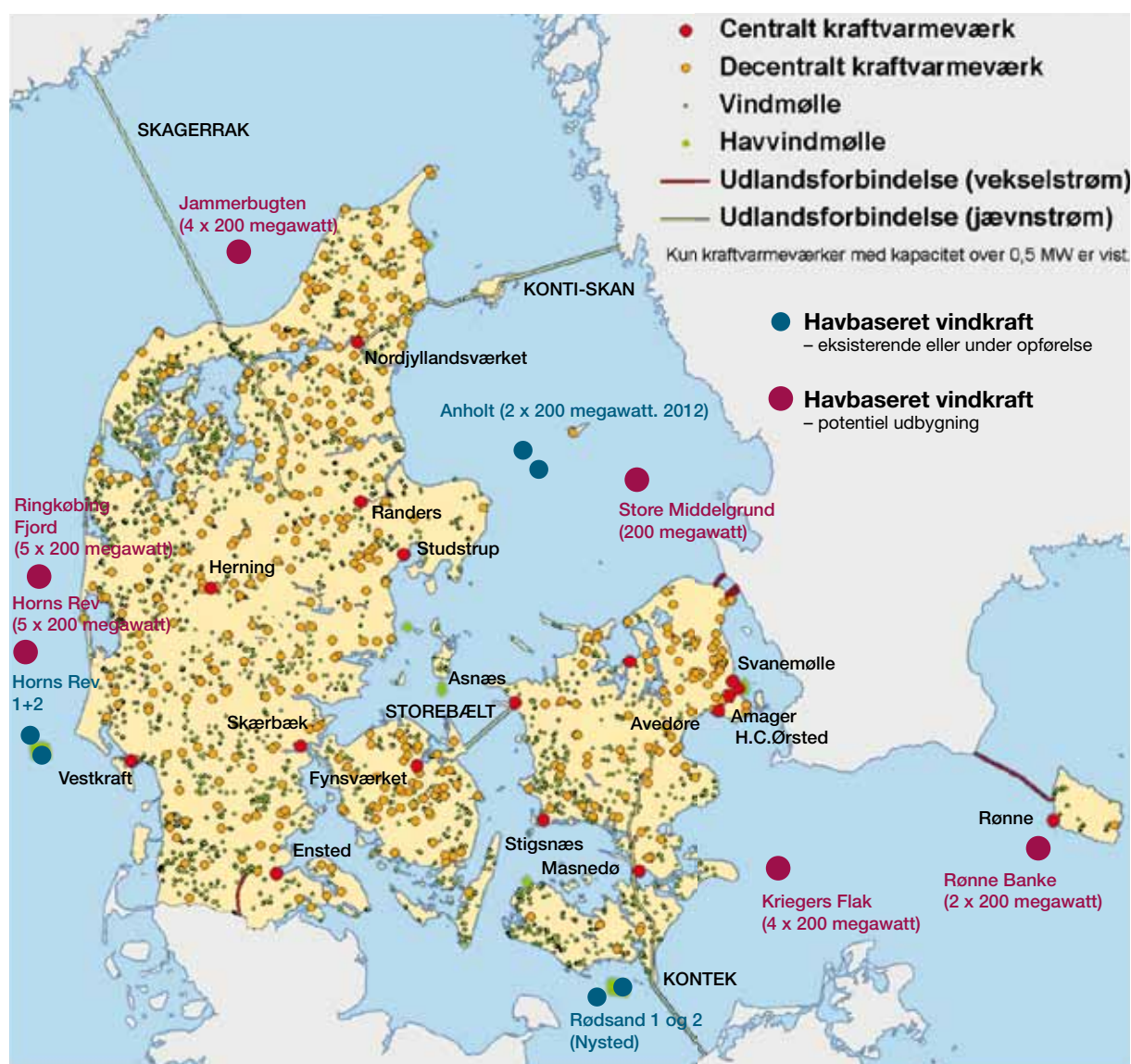
Decentrale anlæg står for en stor andel af elproduktionen i Danmark. Anlæggene er sluttet til elnettet på mellem- og lavspænding. Det vil sige på samme spændingsniveauer som forbruget. De centrale kraftvarmeværker og store havmølleparker er direkte tilsluttet på højspænding. Det er illustreret i [figur 2.1](#). Elnettets opbygning bliver i øvrigt forklaret i [afsnit 6](#).

Decentrale anlæg er en fælles betegnelse for enkeltstående eller grupperede vindmøller på land og for små og mellemstore kraftvarmeværker. Vindmøller på land står for 2.400 megawatt og kraftvarmeværker står for 1.700 megawatt installeret produktionskapacitet i Jylland og på Fyn (2009). På Sjælland og Lolland-Falster udgør landbaseret vindkraft 550 megawatt og kraftvarmeværker 650 megawatt (2009). Dertil kommer produktion fra private forbrugeres såkaldte mikroanlæg

såsom solceller, mikroturbiner, husstands-vindmøller og brændselsceller.

Elproduktionen på de decentrale anlæg er tilstrækkelig stor til at dække hele elforbruget i Danmark, når forbruget er lavt, og der er stærk vind. Men de store centrale kraftvarmeværker kører altid med i baggrunden for at balancere elsystemet og af hensyn til varmemeforbruget.

Alle de gode steder til vindmøller på land er allerede optaget. Tilvæksten i vindkraft på land bliver derfor i form af, at små udtjente vindmøller opgraderes eller erstattes med større og mere effektive anlæg. Landbaseret vindkraft forventes at stige med 350 megawatt, mens produktionskapaciteten på kraftvarmeværker og mikroanlæg i private husstande vurderes at stige til 1.000 megawatt. Det kan dog ændre sig alt efter kommunernes lokalplanlægning.



Figur 5.4: El-infrastruktur 2009

Foto: Energistyrelsens EnergiData. Markering af de enkelte havmølleparker og deres navne samt navne på kraftvarmeværker er tilføjet af forfatteren.



Foto: Lars Aaro

Energieffektive huse bliver ofte udstyret med solcellepaneler. Om sommeren kan solcellerne producere mere el, end husholdningen bruger. Om vinteren bruger husholdningen mere el, end solcellerne kan levere. Hvis solcellerne i løbet af et år giver mere el, end husholdningen aftager fra elnettet, kaldes husene for plus-huse.



Solceller

Solceller omdanner sollys til elektricitet uden generatorer eller andre bevægelige dele og uden udledning af noget art. Solceller producerer jævnstrøm, der skal konverteres til vekselstrøm for at kunne tilsluttes elnettet.

El-produktionen i en solcelle er proportional med sollysets intensitet. Solcellerne producerer el om dagen, hvor forbruget er størst, men ikke om natten, hvor forbruget er lavest. Produktionsmønsteret passer dermed til forbruget og kan delvis erstatte el fra kraftvarmeværkerne i elsystemet. Med andre ord kan solcellerne supplere andre energikilder i et samlet elsystem, men ikke fuldstændig erstatte dem. Forbrugerne skal jo også have strøm, når det er overskyet, og i natteimer, hvor solcellerne ikke fremstiller el.

Virkningsgraden i kommercielt tilgængelige solcellemoduler ligger normalt over 10 procent, hvis solcellerne sidder optimalt i forhold til solen. Virkningsgraden er iberegnet energitab ved konverteringer fra lys til el og fra jævnstrøm til vekselstrøm. Højere virkningsgrad skal primært komme ved bedre konvertering fra lys til elektrisk energi. Prisen på solcellestrøm er i dag noget højere end almindelig købestrøm.

I Danmark bliver solceller mest brugt til solcellemoduler i velegnede (sydvendte) bygningsfacader og tagflader, altså som mikroanlæg, og til at optimere bygningsdrift (primært i nyere og fremtidige bygninger).

Bølgekraft

Bølgekraft udnytter energien i bølger og undervandsstrømninger til fremstilling af el. I Danmark er teknologien endnu på forsøgsstadiet med få og små anlæg, typisk under 1 megawatt. Man arbejder på at kombinere havmølleparker og bølgeenergianlæg for at få bedre balance i produktionen fra havmølleparkerne. Bølgekraft er jævnere og uden de hurtige udsving som karakteriserer havmølleparkerne. Flere nye havmølleparker bygges sådan, at de nemt kan udvides med et bølgeenergianlæg.

Potentialet for bølgekraft i Danmark er stort og kan på sigt bidrage til vedvarende energiproduktion i Danmark på kommercielle vilkår. Storbritannien, Norge og andre lande eksperimenterer også med bølgekraft. Her er anlæggene på flere megawatt.



500 kW bølgekraftmaskine.

Foto: Wave Star Energy



Foto: DONG Energy

KUL
OLIE
VIND
BIOMASSE

5.6. Energiselskaber

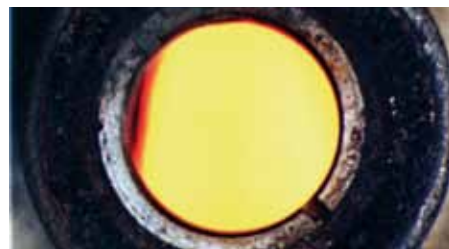
De store centrale kraftvarmeværker og havmølleparker ejes, drives og vedligeholdes af energiselskaber. De største energiselskaber i Danmark er DONG Energy og Vattenfall. DONG Energy ejer de fleste centrale kraftvarmeværker i Jylland og på Sjælland, Horns Rev 2 havmøllepark, Nysted Havmøllepark samt en række decentrale kraftvarmeværker og vindmøller. Vattenfall ejer Amagerværket, Nordjyllandsværket, Fynsværket, decentrale kraftvarmeværker i Hillerød og Helsingør samt er medejer af Horns Rev 1 havmøllepark.

Forbrugerejet energiproduktion

Forbrugerne ejer flere af de decentrale værker, vindmøller og vindmølleparker som enkeltpersoner eller i laug og kooperativer. Middelgrunden havmøllepark består af tyve 2-megawatt-vindmøller og dækker 1,5 procent af elforbruget i Københavns Kommune. Havmølleparken er ejet af møllelauget oprettet som et interessentskab. Interessentskab betyder solidarisk hæftelse. Samtlige vindmøllelaug i Danmark er interessentskaber.

Udenlandske ejere kommer til

De store havmølleparker, som bliver rejst i Danmark, tiltrækker flere udenlandske energiselskaber. E.On. Sverige AS ejer eksempelvis 20 procent af Nysted 1 havmøllepark samt Rødsand 2 havmøllepark med samlet installeret produktionskapacitet på 207 megawatt.



Fotos: Scanpix og Colourbox

Elektrisk energi finder vej til forbrugeren gennem elnettet. Det vigtige ved energiens transportsystem er først og fremmest, at strømmen når frem. Dernæst er det vigtigt, at der ikke bliver spildt alt for meget energi undervejs, og at transporten er så billig som mulig. Elnettet i Danmark kører hovedsagligt på vekselstrøm og er inddelt i forskellige spændingsniveauer alt efter, om der skal meget eller lidt energi igennem ledningerne.

Kabler, luttledninger, jævnstrømsforbindelser, transformatorer og konverterstationer bliver brugt til at koble systemet sammen og til at få energien igennem så glat som muligt.

Elnettet forbinder produktionsanlæggene med stikkontakten. Ligesom i trafikken er der motorveje (trans-

missionsnettet), som kan flytte meget energi over store afstande. Der er landeveje (distributionsnettet) til mere lokal transport af knap så store mængder energi. Og der er biveje, gader og indkørsler, hvor små mængder energi drejer om de sidste hjørner til de enkelte husstande.



Figur 6.1 : Eksisterende transmissionsnet for el

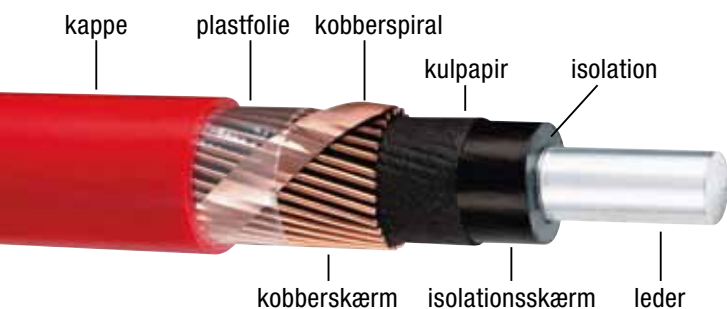
6.1. Højspænding, mellemspænding og lavspænding

Tab og spænding

Som tidligere nævnt er tab forbundet med elektrisk strøm, *udtryk (3.4)*, og leveret elektrisk energi er givet ved at multiplicere spænding med strøm, *udtryk (3.1)* til *udtryk (3.2)*. Ved at anvende en lavere strøm og en højere spænding kan den samme mængde elektrisk energi overføres med lavere tab. Men højere spænding kræver mere avanceret og dyrere elektrisk isolering for at sikre sig imod berøringsfare. Derfor er der forskellige spændingsniveauer i elsystemet.

Spændingsniveauerne

Transmissionsnettet, altså motorvejene til de store energimængder, har højspænding. Højspændingssystemet i Danmark er udført ved 132, 150 og 400 kilovolt. Mellemspændingssystemet, altså landevejene, er ved 6 til 60 kilovolt i Danmark. Vejene og indkørslerne til de enkelte husstande og stikkontakter er ved lavspænding, der typisk er 230 (eller 400) volt. Nogle storforbrugere, typisk industrivirksomheder, er direkte tilsluttet ved 10 kilovolt for at få mere el med lavere tab.



MELLEMSPÆNDINGSKABEL

Copyright © 2010 nkt cables a/s

6.1 Kabler i stedet for luftledninger

Danmark går mere og mere væk fra luftledninger til fordel for kabler i jorden. På mellemspænding forbedrer kabler forsyningssikkerheden. Luftledningerne er nemlig alt for sårbare over for storm og uvejr, fordi ledningerne bliver ramt af grene, små træer eller andre løsrevne ting. Det giver kortslutninger og strømafbrydelser. Det slipper man for med kabler. Desuden undgår man ledningerne i landskabet. Nye strækninger til mellemspænding bliver derfor lagt som kabler i jorden, ligesom eksisterende luftledninger bliver erstattet med kabler. I løbet af ganske få år vil luftledninger til mellemspænding helt forsvinde.



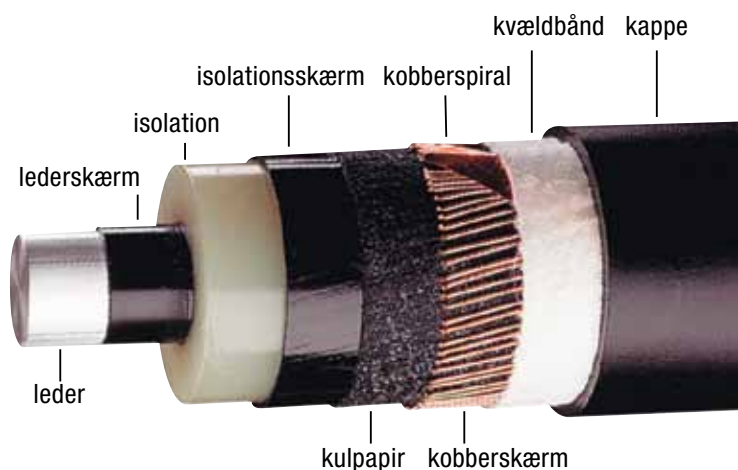
6.2. Luftledninger og kabler

Elnettet består af strækninger med luftledninger og kabler (på land og i vandet). Selvom der er forskellige spændingsniveauer i elnettet, kører hver strækning på samme spænding. Billedligt talt fordi trafikken glider bedst, når alle kører med jævn hastighed uden fartsyndere eller søndagsbilister.

Luftledninger og kabler er dimensioneret til drift ved de forskellige spændinger og sådan, at de kan overføre den nødvendige energi. For eksempel kræver højspænding, at kablerne har stort ledertværsnit og tyk isolering for at kunne transportere meget elektrisk

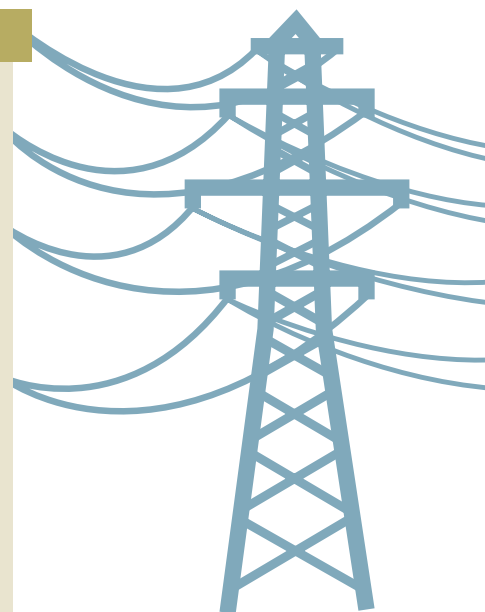
energi og samtidigt overholde kravene til elsikkerhed. Kabler til lavspænding kan klare sig med mindre ledertværsnit og tyndere lag isolering. Det betyder, at højspændingskabler er dyrere end lavspændingskabler. Men lavspændingskabler kan naturligvis ikke bruges til højspænding. Det ville give en trafikprop svarende til den, der ville opstå, hvis motorvejstrafik blev sendt igennem en lille gade. Med andre ord er det nødvendigt at bruge de rigtige kabler til de forskellige spændinger og energitransporter.

HØJSPÆNDINGSKABEL



6.2 Forskønnelse af højspænding

Folketinget har vedtaget at kabellægge højspændingsnettet i Danmark. Det skyldes, at højspændingsmasterne er ret markante pga. deres højde, og som sådan forstyrrer i landskabet. Samtidig gør masterne af og til naboerne utrygge og giver anledning til debat om magnetfelters påvirkning af mennesker. Planer om nye højspændingsmaster er ofte blevet mødt med bred og velorganiseret folkelig modstand. Det er dyrt at lægge højspænding som kabler. Det skyldes, at det er dyrere at etablere og vedligeholde kabler end luftledninger, og prisen stiger med driftsspændingen. Endnu er det ikke teknisk muligt at erstatte alle højspændingsledninger med kabler uden at påvirke driften af det danske elsystem. Derfor starter processen dér, hvor gevinsten for natur og mennesker er størst, eksempelvis ved strækningerne Middelfart (Lillebælt), Aggersund (Limfjorden), Årslev Engsø (Århus), Vejle Ådal, Roskilde Fjord, samt Kongernes Nordsjælland (Helsingør).



6.3. Transformatorer

Elnettet bliver bundet sammen på tværs af de forskellige spændingsniveauer med transformatorer. Transformatorer virker som afkørsler fra motorveje til landeveje. Altså når man transformerer fra høj- til mellemspænding. Når man transformerer fra mellem- til lavspænding, svarer det til afkørsler fra landeveje til gader og fra gader til indkørsler. Transformation bliver også brugt imellem de forskellige spændinger inden for højspænding, for eksempel fra 400 kilovolt til 150 kilovolt, og inden for mellemspænding, for eksempel fra 60 kilovolt til 10 kilovolt.

Transformatoren er 2-polet komponent

Transformatoren er en 2-polet fysisk komponent, illustreret i Figur 6.2. Transformatoren anvendes i systemer med vekselstrøm med samme frekvens i takt med polerne. De to poler kaldes ofte for henholdsvis primærsiden, med den høje spænding, og sekundærsiden, med den lave spænding.

Transformationen udføres med to viklinger, der er N_1 på primærsiden og N_2 på sekundærsiden. Sendes der en vekselstrøm I_1 igennem viklingen N_1 , induceres der en spænding over viklingen N_2 på sekundærsiden. Ved at lukke kredsen aftages der en elektrisk strøm I_2 på sekundærsiden. Det gælder, at strømviklingsforholdet bevares:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (6.1)$$

Transformatoren bliver designet til og opererer under forhold, hvor energitab er minimeret. Ved fulddrift ligger tab i en transformator typisk på mellem 0,5 til 1 procent af den overførte energi. Ved at negligere tab og anvende effekt- og energibevarelsen er der samme elektrisk effekt og elektrisk energi på begge sider af transformatoren.

$$P_1 = P_2 \text{ og } E_1 = E_2 \quad (6.2)$$



En 132/50 kV transformator.

Foto: Stefan Frendrup Sørensen

Hvis transformeren har en spænding U_1 og trækker en elektrisk strøm I_1 på primærsiden og en spænding U_2 og strøm I_2 på sekundærsiden, betyder effekt- og energibevarelsen:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (6.3)$$

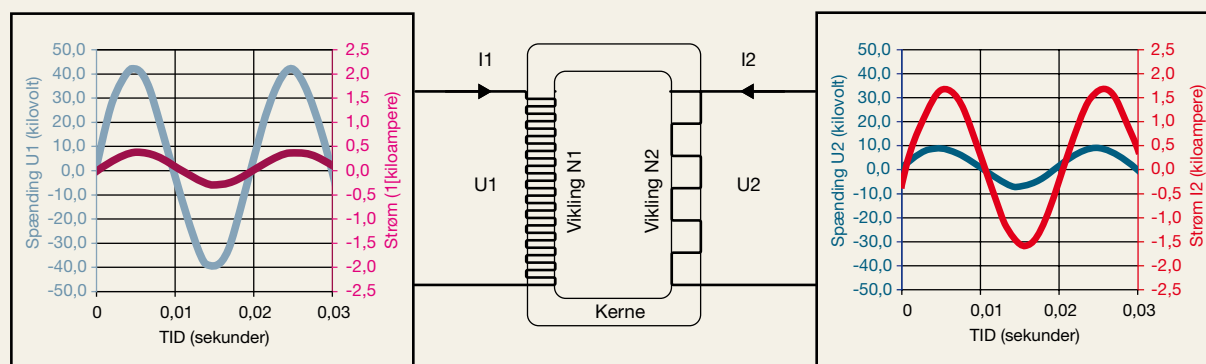
Viklingsforholdet N_1/N_2 er blandt transformerens vigtigste designparametre. Udtryk (6.1) og (6.3) viser, at transformeren udfører spænding og strømtransformation mellem primær- og sekundærsiden ifølge det anvendte viklingsforhold:

$$U_1/U_2 = N_1/N_2 \text{ og } I_1/I_2 = N_2/N_1 \quad (6.4)$$

I praksis fastholdes spændinger på primær- og sekundærsider af transformatorer til de respektive driftspændinger af de strækninger i elsystemet, hvor transformatorerne anvendes. På den måde sikres forsyningskvaliteten.

Elektrisk strøm bestemmes af (el-)behovet på sekundærsiden. Det betyder, at den strøm, der aftages via transformeren på primærsiden, modsvarer den strøm, der behøves på sekundærsiden, hvilket sikrer, at forbrugerne får den strøm og elektriske energi, som de behøver. Det betyder, at uønskede spændingsvariationer og udsving undgås, mens strøm over transformatorerne varierer over tid.

Figur 6.2 Illustration af 2-polet transformator



6.4. Jævnstrømsforbindelser

I systemer med jævnstrøm varierer spændingen ikke. Den holdes på et givet niveau, mens der ændres på strømmen for at overføre en bestemt energimængde. En jævnstrømsforbindelse vil typisk være relevant og økonomisk rentabelt på steder, hvor store mængder energi skal flyttes over store geografiske afstande.

Jævnstrømforbindelser bliver også brugt til at sammenkoble vekselstrømssystemer, der er ude af takt. Begrebet 'ude af takt' betyder, at der er stor faseforskydning mellem driftsspændingerne i to vekselstrømssystemer. Faseforskydningen øges med øget afstand mellem vekselstrømssystemerne.

Ved jævnstrømforbindelser er der ikke faseforskydninger. I Danmark er jævnstrømsforbindelserne Skagerrak mellem Jylland og Norge, Konti-Skan mellem Jylland og Sverige, Kontek mellem Sjælland og Tyskland, samt Storebælt, med planer for flere forbindelser, for eksempel til Holland.

#6.4 Jævnstrøm til elnet i havet

I store havmølleparker er det oplagt at anvende jævnstrømsforbindelser til at skibe de store energimængder ind til forbrugerne på land. Den tyske havmøllepark Bard 1 (2010) med en produktionskapacitet på 400 megawatt er eksempelvis tilsluttet elnettet via et 200 kilometer jævnstrømskabel. Dermed bliver energitabet ved transporten langt mindre end ved et tilsvarende vekselstrømskabel.

På sigt er der planer om at forbinde havmølleparker med forbrugerne via havbaserede elnet, der går uden om de eksisterende elsystemer på land. Det vil nemlig reducere flaskehalse i nettet og forbedre forsyningssikkerheden. Jævnstrømsforbindelser bliver hovedteknologien til energitransporter på havet. Dels fordi der skal flyttes enorme mængder energi over store afstande, dels fordi flere vekselstrømssystemer, som er ude af takt, kan blive forbundet via de havbaserede jævnstrømsnet.



Foto: Energinet.dk

#6.3 Storebælt 1 forbinder øst og vest (2010)

Danmark har ikke et samlet vekselstrømssystem. Sjælland er forbundet til det nordiske vekselstrømssystem. Jylland/Fyn er forbundet til vekselstrømssystemet på det europæiske kontinent. Derfor kan det ikke lade sig gøre at lave en direkte vekselstrømssammenkobling mellem Sjælland og Jylland-Fyn, hvilket er grunden til at Danmark bliver samlet elektrisk med jævnstrømsforbindelser. Den første af slagsen hedder Storebælt 1 og bliver taget i brug i 2010. Storebælt 1-

forbindelsen består af to konverterstationer, der transformerer mellem vekselstrøm og jævnstrøm, på hver sin side af bæltet og 58 kilometer jævnstrømskabel. De 32 kilometer af kablet er søkabel og går på tværs af Storebælt. Forbindelsen mellem Øst- og Vestdanmark er blandt andet nødvendig for at forbinde Jyllands store vindmølleparker med forbrugerne på Sjælland. På Sjælland er andelen af vindmøller ikke så stor som i det vindrige Jylland.

Konverterstationer

En jævnstrømsforbindelse består normalt af et jævnstrømskabel med en konverterstation i hver ende, jf. [figur 6.3](#). Konverterstationerne sørger for at transformere mellem vekselstrøm (vekselspænding) og jævnstrøm (jævnspænding). Konverterstationerne kaldes vekselretter, når de konverterer fra vekselstrøm til jævnstrøm, og inverter, når de konverterer fra jævnstrøm til vekselstrøm.

Den internationale betegnelse for de to strømtyper er AC og DC. AC betyder Alternating Current og er vekselstrøm. DC betyder Direct Current og er jævnstrøm.

Normalt bliver jævnstrømsforbindelser bygget til højspænding for at kunne overføre store mængder elektrisk energi med små tab. Tabet i konverterstationer er typisk mellem 1 og 1,5 procent af den overførte energi ved fulddrift.

Ved at negligere tab og anvende effekt- og energibevarelse for en jævnstrømsforbindelse, gælder det:

$$P_{1AC} = P_{DC} = P_{2AC}, E_{1AC} = E_{DC} = E_{2AC}, \\ \text{og } U_{1AC} \cdot I_{1AC} = U_{DC} \cdot I_{DC} = U_{2AC} \cdot I_{2AC} \quad (6.5)$$

hvor indeks 1AC og 2AC henviser til strøm I , spænding U , effekt P og energi E i de to vekselstrømssystemer ved konverterstationerne og DC i jævnstrømsleddet.

Vekselstrøm skifter retning

I vekselstrømssystemer fastholdes spændingen, mens energimængde og retning bliver bestemt af forbrugernes behov.

For at vende tilbage til trafikken som illustration, svarer vekselstrømsforbindelser til almindelige landeveje, hvor trafikken kan gå i begge retninger. Den retning, som de fleste biler kører i, afgør den samlede trafikretning. Trafikretningen kan hele tiden ændre sig, alt efter om der kommer flere biler i den ene eller den anden retning. Bilerne kan jo hele tiden køre til eller fra vejen.

Jævnstrøm er ensrettet

Jævnstrømsforbindelser svarer derimod til ensrettede veje. I modsætning til vekselstrømssystemer ligger mængde og retning af energien i jævnstrømsforbindelser nemlig fast, fordi den bliver styret af konverterstationerne. Rollefordelingen mellem konverterstationerne som vekselretter og inverter er fastlagt på forhånd. Energiens retning går fra vekselretter til inverter.

Retningsændring på jævnstrømsforbindelse

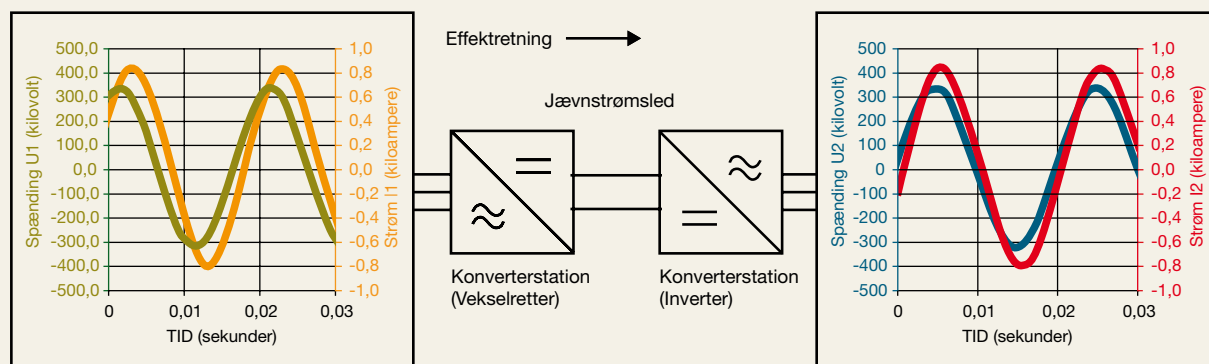
Man kan godt ændre energiretningen, men det kræver, at man omdefinierer rollerne mellem de to konverterstationer. Det tager tid og kræver et styringsindgreb.

Styringsindgrebet består af flere trin:

- 1) elektrisk strøm reguleres til nul,
- 2) rollefordelingen mellem konverterstationerne omdefinieres,
- 3) jævnstrøm reguleres op til et ønsket niveau (og retning). På danske jævnstrømsforbindelser tager det fra et par sekunder op til ganske få minutter at ændre energiretning.

Figur 6.3

Jævnstrømsforbindelse mellem to vekselstrømssystemer ude af takt



6.5. Netselskaber og systemansvar

ELDISTRIBUTION SYSTEMANSVAR



Foto: Energinet.dk

Arkitekter og ingeniører arbejder med at designe nye højspændingsmaster til strækningen mellem Kassø og Tjele. Udviklingsarbejdet har foreløbig resulteret i to nye mastetyper – Eagle-masten (herover) og Stealth-masten. Begge kan udføres i forskellige materialer. De kan også produceres i forskellige højder, således at ledningen kan indpasses bedst muligt i de forskellige landskaber.

Højspændingsnettet i Danmark, defineret som motorvejene for levering af el, ejes og drives af den systemansvarlige virksomhed Energinet.dk og de regionale transmissionsselskaber. Højspændingsnettets spænding er 150 kilovolt og 400 kilovolt på Fyn og i Jylland, samt 132 kilovolt og 400 kilovolt på Sjælland og Lolland-Falster. Energinet.dk ejer alle 400 kilovolt elnet i Danmark, 132 kilovolt elnet i Nordsjælland og er medejer af elektriske veksel- og jævnstrømsforbindelser til Norge, Sverige og Tyskland.

Systemansvarlig har samfundsopgaver

Energinet.dk har i tilgift flere samfundsmæssige opgaver:

- 1) økonomisk rentabel, bæredygtig og pålidelig drift, vedligehold og udbygning af det overordnede højspændingsnet på kort og lang sigt,
- 2) overvågning af elpriser og konkurrence på elmarkedet,
- 3) støtte, udvikling og demonstration af teknologier til miljøvenlig energiproduktion,
- 4) opgørelse af udledninger af stoffer, for eksempel CO₂, NO_x og SO_x, til miljøet fra energisystemet i Danmark.

Distributionsselskaber

Distributionsselskaberne ejer og driver distributionsnettet, som er elnettet på lav- og mellemspænding. Det vil sige med spænding fra 230 volt (stikkontakter i boliger) op til 60 kilovolt på mellemspænding.

Elforbrugeren

Elforbrugeren ejer normalt selv den sidste del af lavspændings-installationen, for eksempel fra sikringen i vejen og frem til stikkontakten.

Ansvar for tilslutning af nye anlæg

Energinet.dk skal sørge for at nye store produktionsanlæg bliver tilsluttet højspændingsnettet. De lokale distributionsselskaber skal sørge for tilslutning af mindre anlæg på mellemspænding.



Elmarked og samtænkning af energisektorer

Det danske elmarked består af producenter af el, de der handler varen (elhandelsselskaber), de der bringer varen ud til kunden (netselskaber) og elforbrugerne. Som elforbruger har du siden 2003 frit kunne vælge, hvor du vil købe din strøm. Når strømmen skal leveres, benytter du derimod det netselskab, der ejer nettet frem til dit hus. Det skyldes, at der er monopol på elnettet.

7.1. Elmarked

Danmark har et liberaliseret elmarked. Gennem elmarkedet sikres, at udbud og efterspørgsel balancerer.

Med indførsel af det frie elmarked i Danmark i 1999/2000 blev elnettet og produktionen af elektrisk energi adskilt, jf. afsnit 5.1. Elnettet er monopol, og dermed er der lige adgang for alle aktører. Elproduktionen er derimod konkurrenceudsat.

Elmarkedets aktører

Elmarkedets aktører er energiselskaber (producenterne), elhandlere, netselskaber og forbrugere. Priser på el bliver bestemt af udbud (produceret el) og efterspørgsel (forbrug). Selve handlen med el foregår på elbørsen. Danmark deltager i den nordiske elbørs, Nord Pool.

Danmark – en del af det nordiske elmarked

Danmark er en del af det nordiske elmarked. Det vil sige, at som udgangspunkt håndteres en stor del af handlen sammen med de øvrige nordiske lande.

Elmarkedet er ikke ét, men flere markeder, der tidsmæssigt hænger efter hinanden – det finansielle marked, spotmarkedet, intradaymarkedet, regulérkraftmarkedet og markeder for øvrige reserver.

Det finansielle marked

På det nordiske finansielle marked handles prissikringskontrakter op til fem år frem. Det vil sige, at du i dag fx kan købe el til at dække dit forbrug i 2013 til en bestemt pris.

Elspotmarkedet

Det mest centrale marked er elspotmarkedet. Her handles fysisk el til levering dagen efter. Det vil sige, at handlerne indgås dagen før det egentlige driftsdøgn. Prisen fastsættes ud fra udbud (produktion) og efterspørgsel (forbrug), se figur 7.2. Det nordiske elspotmarked hedder Nord Pool Spot og priser mv. kan findes på www.nordpool.dk. Nord Pool Spot er ejet af de systemansvarlige i de nordiske lande (i Danmark er det Energinet.dk).

Intradaymarkedet, Elbas

Fra handlerne er indgået på elspotmarkedet et døgn før driftsdøgnet, kan der ske mange uforudsete hændelser som havarier af produktionsanlæg og ændrede vindfronter. Frem til timen før driftstimen kan elhandlere, elproducenter m.fl. derfor indgå handler til at håndtere disse situationer på intradaymarkedet. I Norden hedder intradaymarkedet Elbas.

Regulérkraftmarkedet

På regulérkraftmarkedet handles med op- og nedregulering på produktionsanlæggene og i forbruget i selve driftstimen. Regulérkraftmarkedet bruges af de systemansvarlige (Energinet.dk i Danmark), som køber regulérkraft direkte fra producenter og forbrugere, der lægger bud ind i markedet. Et bud betyder fx, at producenterne angiver den pris, som de skal have for at skruer produktionen op med 1 MW i den næste time.

#7.1 To prisområder i Danmark – nu også negative priser

Danmark er delt i to prisområder: Vestdanmark og Østdanmark. Det betyder, at der er forskellige elpriser i de to områder. Prisen varierer fra time til time og er afhængig af forbrug, produktion og begrænsninger i elnettet. Vindkraft vil fx gøre prisen lavere. Da der er mest vind i Vestdanmark er de vstdanske priser i gennemsnit lidt lavere end priserne i Østdanmark.

Fra oktober 2009 er der indført negative afregningspriser i Danmark. Det betyder, at producenterne kan opleve at blive afkrævet betaling i stedet for at få

penge for leveret el. Indtil da var den mindste afregningspris nul kroner. De negative priser opstår, når der er meget stor produktion af el, typisk i nattetimer med stærk vind og lavt forbrug. Negative elpriser skal få anlæggene til at skruer ned for produktionen eller alternativt få forbruget op. Det forventes, at negative priser kun vil forekomme nogle få timer om året, fordi markedet vil søge at afbalancere produktionen og forbruget inden negative priser træder i kraft.

SMART GRID



Illustration: Jakob Christensen

På grund af den øgede mængde uflexible produktion som vindkraft, er balancering mellem produktion og forbrug i selve driftstimen blevet endnu mere vigtig. Regulærkraftmarkedet er derfor under udvikling bl.a. ved at forsøge at inddrage flere ressourcer som fleksibilitet i forbruget og koble markedet til det øvrige Europa (fra Tyskland og sydpå).

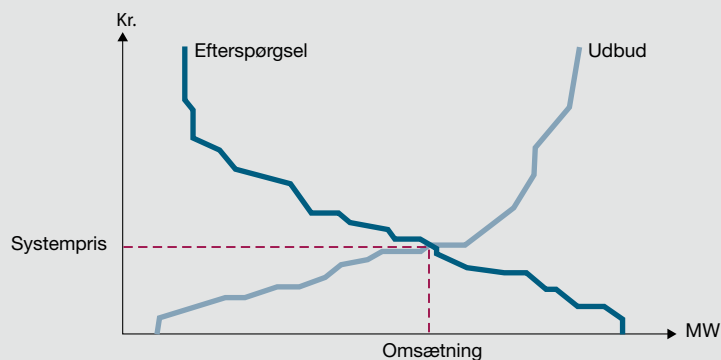
Markeder for øvrige reserver

De systemansvarlige har brug for mange typer af reserver til at håndtere balancen i elsystemet i hvert sekund. På den danske systemansvarliges hjemmeside, www.energinet.dk, findes et samlet overblik over typer af reserver og mængder.

7.2. Fleksibelt elforbrug

Fleksibelt elforbrug betyder, at elforbruget styres af prissignaler. Energigtunge husholdningsapparater som vaskemaskiner, opvaskemaskiner, tørretumbler og i en vis udstrækning køleskabe og fryserne vil kunne fjernstyres, så de tænder og bruger strøm, når der er masser af billig elektrisk energi. Strøm er billig, når der er meget vind og lavt forbrug, for eksempel om natten. Omvendt slukker apparaterne på tidspunkter, hvor energien er

Figur 7.2 Fastlæggelse af elprisen i elspotmarkedet



knap og dermed også dyr. Ikke meget forbrug i Danmark er fleksibelt i dag, men forventes i et vist omfang at kunne blive det inden for en årrække.

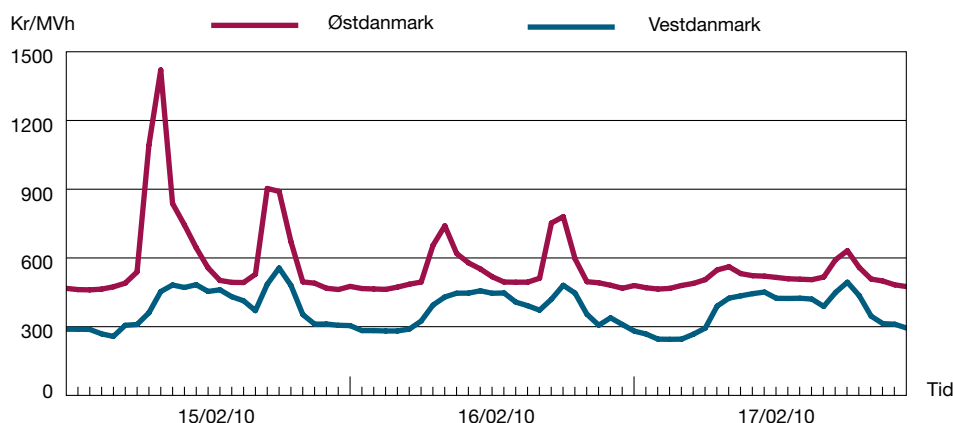
Smart Grid

Fleksibelt elforbrug forudsætter en avanceret styring, så alle apparaterne ikke tænder eller slukker på én gang. Det ville give ekstra udfordringer med balance-ning af pludselige og markante spring i elforbruget. Den nødvendige avancerede styring skal udvikles inden for konceptet kaldet 'Smart Grids'. Konceptet står for integration af avanceret måleindsamling, reguleringsteknik og kommunikation i elforsyningssystemer. Elmarkedet vil i den sammenhæng stå for prisdannelsen på strøm og derved også for prissignalerne.

7.3. Samtænkning med transport- og varmesektorerne

Samtænkning af elforsyning med transport- og varme-sektoren går ud på at finde og udnytte synergieffek-terne mellem vedvarende energikilder til elproduktion og reduktion af fossile brændsler (olie og kul) i elforsyning, transport og varmeproduktion.

Figur 7.1 Elprisernes variation i Øst- og Vestdanmark



Elbiler

I transportsektoren betyder samtænkning eksempelvis, at elbiler¹ kan være med til at balancere den omskiftelige elproduktion fra vedvarende energikilder, primært vindkraft. Med andre ord kan batteridrevne elbiler lade op på tidspunkter med lav pris på el, fx i timer med meget el fra vindkraft. I perioder med vindstille eller højt forbrug kan elbilens batterier afgive strøm til elsystemet. Alt i alt afløser vindkraft altså fossile brændsler til både benzin og elproduktion.

Batteriopladning

Batteriopladningen kan foregå på tre måder: (1) hos forbrugerne, det vil sige i private husstande eller på arbejdspladser med individuelle ladestationer; (2) på centrale ladestationer, det vil sige ved større parkeringshuse, hvor mange elbiler kan oplades; (3) batteriskiftestationer, hvor et afladet batteri kan byttes til et opladet batteri.

Koncepterne (1) og (2) binder tidspunktet for opladningen til behovet hos forbrugeren. Hvorimod koncept (3) åbner mulighed for at lade batterierne op uafhængigt af forbrugerens behov og altså på tidspunkter, hvor det



Foto: Tesla Motors

passer bedst til elsystemets behov for balancering af produktion og forbrug. Disse tidspunkter er kendetegnet ved, at elprisen er lav.

Elbiler til dig og mig

De første elbiler har allerede fundet vej til Danmark. Indtil videre især i kommuner og virksomheder med en grøn profil. Elbiler kan inden for en overskuelig årrække nå et bredt udsnit af private forbrugere. I år 2025 forventes, elbiler at udgøre 25 procent af personbilerne og 15 procent af varebiler og busser.



#7.2 Jordvarme mest effektivt til private husstande

Jordvarmeanlæg indeholder et sæt slanger med komprimeringsvæske. Slangerne graves ned i jorden og væsken sættes i cirkulation af en pumpe. Akkumuleringen af solenergien i jorden gør, at temperaturen nede i jorden er højere end komprimeringsvæskens temperatur. Væsken optager varme fra jorden og overfører den til centralvarmeanlægget, hvor varmen komprimeres ud af væsken. Jordvarmeanlægget kører på el til varmekomprimering og pumpe, men forbrugeren sparer til gengæld på varmeregningen og bidrager til integration af vindkraft.

Illustration: Frits Ahlefeldt-Laurvig



Foto: Electrolux

Elpatroner og varmepumper

I varmesektoren betyder samtænkning, at de termiske anlæg supplerer varmeproduktionen med varme produceret af elpatroner, og at varmepumper vinder indpas hos store såvel som små private forbrugere.

Elpatroner er kort og godt store elektriske kedler, der opvarmer vand, når prisen på el er lav, fx når elforbruget er lavt og vinden blæser. Energien går altså ikke til spilde, men bliver gemt som varme, der kan distribueres ud til forbrugerne.

Varmepumper komprimerer varmen i et fysisk system. Det kan for eksempel være varmen fra et kraftvarmewærk, solenergien i jorden (jordvarme), i luften (luft-vand varmepumper) eller i søvandet (vand-vand varmepumper). Varmekomprimeringen fungerer som et omvendt køleskab. Processen kræver strøm, hvilket ideelt set betyder, at der er bedre plads til el produceret af vindmøller.

¹ Der er flere muligheder for at kunne reducere forbruget af oliebasebrændsler inden for transportsektoren, som for eksempel indførelsen af plantebaserede biobrændstoffer, biogas og brint m.m. Flere af disse løsninger vil kunne kombineres med anvendelsen af elbiler.

Perspektivering: Fremtidens CO₂-frie elforsyning i Danmark

Ud med fossile brændsler, ind med mere vedvarende energi. Vi vil gerne passe på vores miljø og udelukkende have grøn strøm i stikkontakten. Men hvad skal der til for, at fremtidens elforsyning kommer fra 100 procent grøn energi? Er det teknisk muligt med den viden og indsigt, vi har i dag? Dette hæfte har skitseret tendenserne i Danmark. Især bliver der lige nu forsket og udviklet i samtænkning af el-, transport- og varmesektorerne. Kan elbilerne løse udfordringerne? Eller el til opvarmning og transport? Tendenserne er der, men spørgsmålene er mange, og svarene er ikke givet endnu. Dem kan kun I og fremtiden give.

Der er også nogen, der tænker i helt andre retninger – fx mod Afrika og al den grønne sol- og vindenergi, vi vil kunne hente der i form af storskala projekter ude i ørkenområder. Det er en interessant tankegang, men for at den kan realiseres, skal der voldsomt mange penge på bordet. Løsningen vil kræve enorme investeringer i el-infrastruktur ned gennem Europa og over Middelhavet til Afrika, hvor transmissionsnettet vil skulle udbygges kraftigt for at kunne levere sol- og vindenergien fra Afrika til Europa.

På vores egne breddegrader vil en massiv udbygning med vind- og bølgeenergi og havbaserede elnet i Nordsøen kunne fortrænge fossile brændsler og styrke forsyningssikkerheden.

Hvis vi vil den 100 procent CO₂-frie – eller måske endda 100 procent fossilfrie – elforsyning, er der fortsat behov for forskning, udvikling og demonstration inden for området. Der skal tænkes nyt og kreativt. Der er

desuden brug for politiske beslutninger og rammebetingelser. I opstartsfasen kan det ikke løbe rundt på rene markedsvilkår. Hvis ikke elbilerne får afgiftsfritagelse, er de fx meget dyrere end de traditionelle benzindrevne biler, og almindelige forbrugere vil ikke have råd til at købe en elbil. Det koster også mange penge at opbygge hele infrastrukturen til elbilerne.

I kan selv i klassen tage en diskussion af de muligheder og begrænsninger, som I ser for fremtidens elforsyning i Danmark. I kan eventuelt tage udgangspunkt i, hvordan I bruger strømmen fra stikkontakten – og til hvad – i dag og i fremtiden.

Ligeegyldigt hvilken løsning vi vælger for fremtidens elforsyning, er det en interessant udvikling, vi går i møde, og det er energitekniske og samfundsrelevante udfordringer, der venter fremtidens ingeniører, forskere og udviklere inden for elforsyningsområdet.





danskenergi

Rosenørns Allé 9
1970 Frb. C
Tlf: 35 300 400

