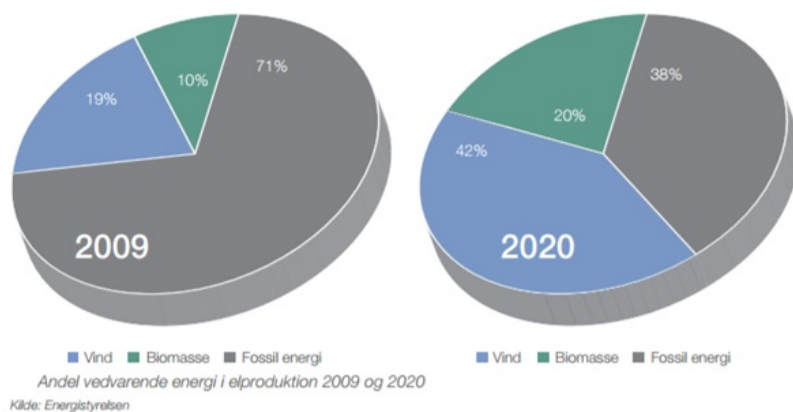


1.1 2050 Energistrategi

Den danske regering har skrevet under på, at Danmark i 2050 skal være fuldstændig uafhængig af fossile brændsler. Det vil sige at Danmark skal være fri for kul, olie og naturgas. Dette medfører at Danmark fremadrettet skal satse på bæredygtig energiteknik, herunder vindenergi, bølgekraft, solceller og biomasse. I 2020 skal 42% af Danmarks energiproduktion komme fra vindenergi, som set på figur 1.1.



Figur 1.1. Cirkeldiagram over Danmarks energiproduktion



Figur 1.2. Grad af kommercialisering i energisektoren på verdensplan

Vi kan se på figur 1.2 at vand-, vindkraft og biomasse allerede er i massemarked, så det er allerede muligheder, som bliver brugt og videreudviklet. Imens solceller bliver solgt og forbedret løbende. Brintteknologi er stadig i udviklingsfasen. I Danmark er vindenergien i højsædet, grundet vores kystnære områder, samt flade landskab.

1.2 Hvordan virker en vindmølle?

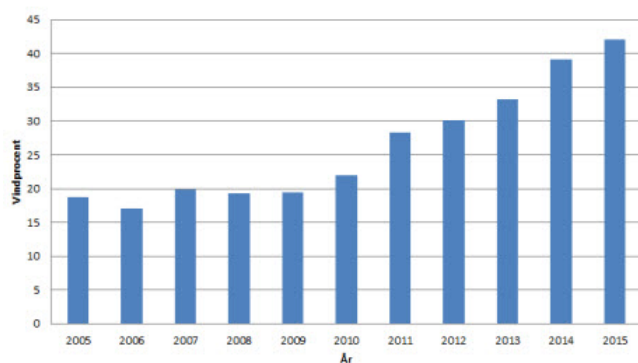
Regeringens målsætning om 100% vedvarende energi i Danmark inden 2050 skal primært udføres med vinden som energikilde.

Det ser også lyst ud, da energiproduktionen fra vindenergi i Danmark er vokset støt siden 2009. Her producerede de danske vindmøller 19,4% af den samlede danske energiproduktion. Hvorimod at de i 2015 stod for hele 42,1% af den samlede produktion, hvilket kan ses på figur 1.2. I 2016 led produktionen et lille fald til 37%, hvilket var forårsaget af en væsentlig mindre mængde blæst end årene forinden. Fremover vil der dog komme flere vindmølleparker, hvilket får vindenergiens andel i den samlede produktion til at stige.

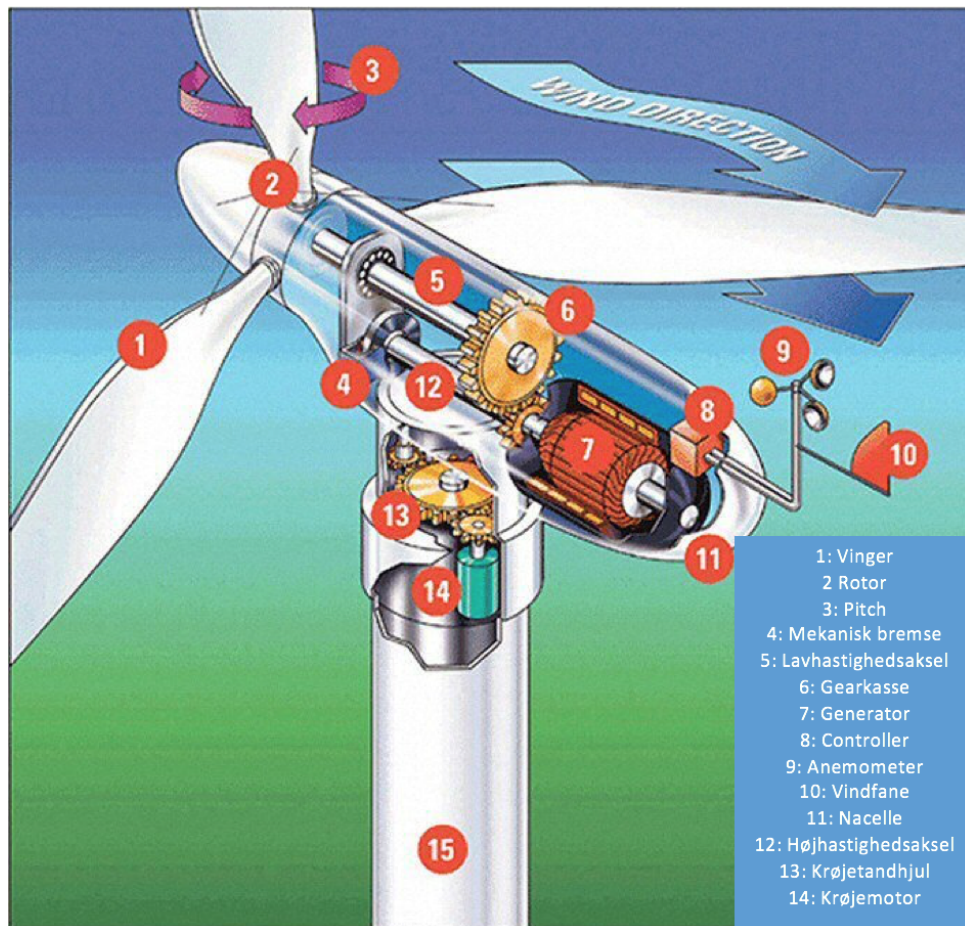
Udnyttelsen af vindenergi i Danmark sker primært med vindmøller af typen horisontal akslede hurtigløbere. En hurtigløber er opbygget af flere forskellige komponenter, hvor de vigtigste heriblandt er rotoren, gearkassen, generatoren, lav- og højhastighedsakslen. Det er disse 5, der er med til at omdanne vindens kinetiske energi til en elektrisk effekt, som kan udnyttes af den danske elforbruger.

Processen starter med at vindmøllens vinger opfanger vinden. Når vinden passerer vingerne, kommer der en trykforskel omkring vingen, som giver en opdrift, hvilket får vingerne til at rotere. En grundigere forklaring af hvorfor vingerne begynder at rotere findes i teori afsnittet under Bernoullis ligning.

Når vingerne begynder at rotere, har vinden afgivet noget af sin kinetiske energi til vingerne, hvormed den er blevet omdannet til rotationsenergi. Vingerne er med rotoren forbundet til en lavhastighedsaksel, som med rotationsenergien fra vingerne får en gearkasse til at rotere. Gearkassen er forbundet videre til en højhastighedsaksel, som på grund af gearkassen roterer omtrent 50 gange så hurtigt som lavhastighedsakslen. Højhastighedsakslen driver vindmøllens generator, hvor induktion omdanner rotationsenergien til en elektrisk effekt. Vindmøllens samlede opbygning og hvordan de forskellige komponenter er forbundet kan ses på figur 1.3.



Figur 1.3. Figuren viser en graf over vindenergiens andel af den samlede energiproduktion [?]



Figur 1.4. Figuren viser komponenterne i en hurtigløber [?].

På figur 1.3 ses også vindmøllens krøjemotor. Det er denne motor, som drejer vindmøllehuset, så dens vinger står vinkelret mod vinden. Det er nemlig i denne position, at vindmøllen er mest effektiv. Hvornår og hvor meget vindhuset skal drejes for at indstille sig efter vinden afgøres af vindmøllens controller. Denne aflæser vindmøllens vindfane, begge kan ses på figur 1.3. Selve rotorbladene kan også rotere en smule for at være i stand til at slippe lidt ud af den i tilfælde af overproduktion. Funktionen kan også anvendes til at fange vinden bedre og gøre møllen mere effektiv, ligesom med krøjemotoren. Men selvom at man kan udnytte disse redskaber til at optimere energiproduktionen, ligger vindmøllens effektivitet mellem 35 – 45%. Effektiviteten bliver dog endnu lavere, når man tager højde for tab i blandt andet gearboksen og generatoren. Tages der højde for disse tab ender vindmøllen kun med at omdanne 10 – 30% af vindens kinetiske energi til en elektrisk effekt. Dette er et godt stykke under det teoretiske maksimum udtrykt af Albert Betz i 1919. Han beviste, at det maksimalt er muligt at omdanne 59% af vindens kinetiske energi med vindmølletyper som en hurtigløber. En dybere gennemgang af dette kan findes i delen af teori afsnittet omhandlende Betz lov.

Havde vindmøllen haft en effektivitet på 100%, ville den tage alt energi ud af vinden, hvilket ville forårsage, at vindmolekylerne bremser fuldstændig op bag rotoren og blokerer passagen for de næste vindmolekyler. Dette medfører, at vindmøllen ville stoppe med at producere en effekt.

Landskabet, hvor vindmøller placeres, har også en indflydelse på den producerede effekt. Omkring jordoverfladen er der flere forskellige faktorer, der kan spille ind og formindske udbyttet fra

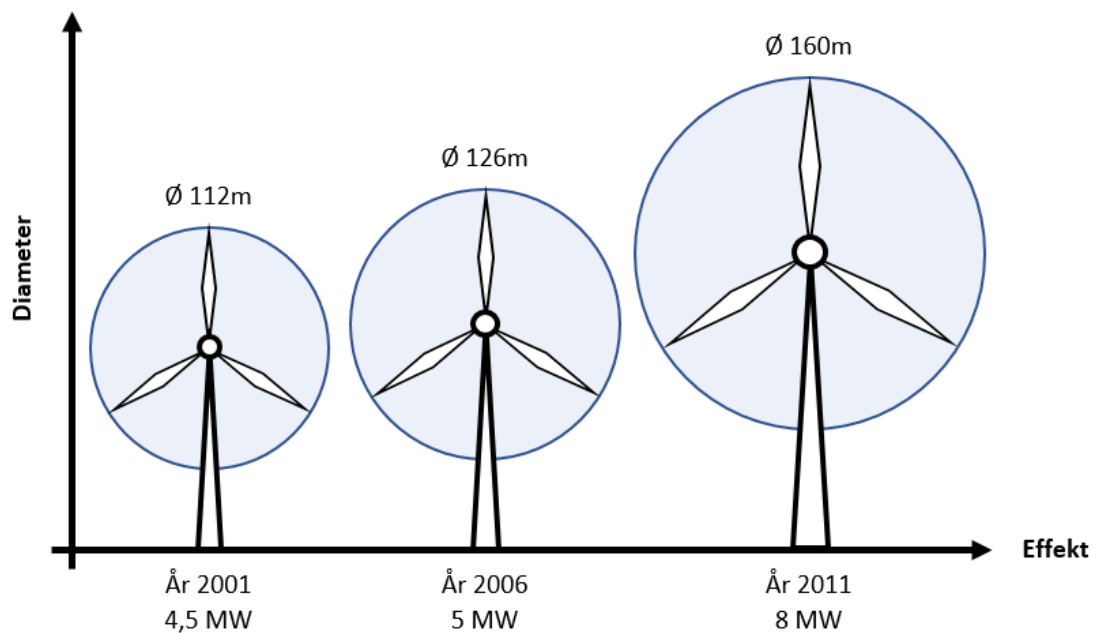
vindmøllen. Faktorer, der kan have en negativ indflydelse, kan for eksempel være skove, bjerge eller bygninger. Disse ting er både med til at give læ for vinden og samtidig skabe turbulens. Turbulensen sker typisk bag lægivere og er med til at få vindhastigheden til at variere både i hastighed og retning, hvilket medfører en nedsat produktion. Opstilles vindmøllen derimod på en græsmark eller det åbne hav vil vinden næsten ikke blive påvirket af landskabet. Begge overflader er forholdsvist glatte og vil tilnærmelsesvis ikke yde nogen modstand på vinden. De forskellige typer landskab kan inddeles i ruhedsklasser, som er med til at præcisere, hvor det er mest profitabelt at placere møllen. Ruhedsklasserne spænder mellem 0 og 4, hvor 0 svarer til en vandoverflade og 4 til en stor by med skyskrabere. Udover ruhedsklasserne har afstanden fra jordoverfladen og op til vingerne også en betydning for den producerede effekt. Jo længere væk vingerne befinder sig fra jordoverfladen, jo mindre bliver vinden påvirket af det omkringliggende landskab. Sammenhængen mellem højden og vindhastigheden kaldes for vindgradienten og kan afbildes med højden som funktion af vindhastigheden, hvor højden vil vokse eksponentielt, som en parabel. Det er altså både profitabelt at placere vindmøllerne steder med en ruhedsklasse så tæt på 0 som muligt og/eller så højt som muligt. Dette er også grunden til, at der bliver oprettet så mange vindmølleparker ude på havet. Her er den eneste lægiver vindmøllerne selv og det er derfor ikke nødvendigt at bygge vindmøllerne alt for høje. Effekten havvindmøllerne producerer, ryger ud på elnettet og i sidste ende transporteret hen til forbrugeren. Effekten har altså en længere rejse undervejs i forhold til hvis nu, den blev produceret lokalt. Det gør den på de decentrale kraftværker, men i takt med at forbrændingen af fossile brændsler bliver udfaset, vil det være oplagt at opstille vindmøller eller anden form for vedvarende energi tæt på forbrugerne. I byerne er ruhedsklassen dog for høj og udover det er der også forskellige politiske regler, der umuliggør en eventuel opsætning af en vindmølle. Derfor vil det være fordelagtigt at opstille en invelox, da den med sit design vil blive mindre påvirket af de omkringliggende lægivere. Derudover er der endnu ikke opstillet nogle politiske begrænsninger angående dens størrelse og placering.

Størrelse:

Da Danmark har gode forhold for vindenergi, kommer det ikke som en overraskelse, at der er stor fokus på udvikling indenfor området, og især hvad gælder vindmøller. Ifølge energiforliget for år 2020, så skal halvdelen af Danmarks energiforbrug være dækket igennem vindenergi. Dette vil bl.a. ske ved at reducere antallet af vindmøller installeret på land og i stedet fokusere på havvindmøller. Et andet tiltag for at øge energiudbyttet fra vindmøller er ved at optimere selve vindmøllerne. Herved kan der ses på vindmøllernes vingelængde, hvilket bestemmer det bestrøgne areal af den vind, som møllerne påvirkes af. Formlen for det bestrøgne areal er lig formelen for et cirkelareal:

$$A = \pi * r^2 \quad (1.1)$$

Det bestrøgne areal har indflydelse på den effekt, som vindmøllerne yder, hvilket gør vingelængden på vindmøllerne vigtig for det givne udbytte af energi. Jo større vingemålene bliver, des større effekt, men det stiller også større krav til f.eks. møllens generator og konstruktion, så den ikke bliver revet i stykker. Igennem de sidste tredive år har europæiske regeringer finansieret eksperimentelle vindturbiner til videre udvikling. Ved år 2001 blev der opsat havvindmøller med en diameter for det bestrøgne areal på 112 meter, hvilket kunne generere en effekt på 4,5 MW. Ti år senere i år 2011 var diameteren for det bestrøgne areal steget til 160 meter, hvorved møllerne kunne generere 8 MW.



Figur 1.5. Udviklingen af størrelse og effekt for havvindmøller sponsoreret af regeringer i Europa

Private virksomheder er begyndt at følge med og overhale de eksperimentelle havvindmøller, hvor Vestas A/S opførte havvindmøller med en diameter på 164 meter med en effekt på 7 MW i år 2011.

Oversigt over virksomheders største vindmøller 2011:

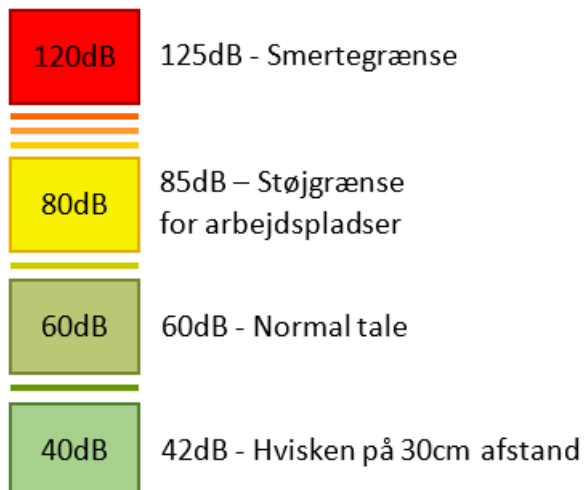
Vestas	164m med 7MW
Nordex	150m med 6MW
Bard	122m med 6,5MW
Alstom	150m med 6MW
NPS	175m med 8MW

Udviklingen indenfor vindmølleindustrien er fortsat i gang, hvor der forsøges at producere mere effektive vindmøller end de eksisterende. Så sent som i december 2016 blev der prøvekørt prototypen på en ny 8MW vindturbine produceret gennem et samarbejde mellem Vestas Wind Systems A/S og Mitsubishi Heavy Industries (MHI). Denne prototypes platform er blevet modificeret, så det er muligt at generere en effekt på op til 9MW under de rigtige forhold.

MHI Vestas forklarer, at turbinerne kan indsættes i eksisterende 8MW havvindmøller, hvilket gør dem i stand til at opnå en effekt på de 9MW ved samme rotorareal. Dette medfører, at der mindskes udgifter for opbygningen af vindmølleparker, bl.a. i form af ændringen på allerede opførte havvindmølleparker, da turbinerne kan udskiftes i stedet for selve møllerne. Derudover skal der færre vindmøller til for at leve op til effektkravet omkring havvindmølleparker, hvilket gør produktionen af parkerne billigere. Under testkørslen af turbinen, blev der genereret 215.999,1kWh over 24 timer, hvilket er tilsvarende den energi, som skal benyttes til at forsyne omkring 20.000 husstande. Ud fra dette slog prototypen verdensrekord for energi produceret.

Støj:

Vindmøller er maskiner, hvilket gør, at de udsender støj. Denne støj kan have indflydelse på beboere i nærheden af møllerne, og derfor er der opsat regulativer for, hvor meget vindmøller må støje. For landbaserede vindmøller er støjgrænsen for møllerne inddelt i to kategorier alt efter, om møllerne er placeret i et åbent miljø, eller om de står nær bebyggelse. Ved opbygningen af en ny vindmølle skal lyden fra omkringliggende møller medregnes, så den totale sum ikke overskrider støjgrænsen. Målingen for støj foretages ved en afstand af 15 meter fra det mest støjende punkt omkring møllen ved to forskellige vindhastigheder, henholdsvis 6m/s og 8m/s. Ved en vindhastighed på 6m/s, hvor landbaserede vindmøller i et åbent miljø har en støjgrænse på 42dB, mens vindmøller nær bebyggelse har en støjgrænse på 37dB. Ved en højere vindhastighed på 8m/s er grænsen opsat til 44dB ved et åbent miljø og 39dB nær bebyggelse. For alle landbaserede vindmøller ved begge vindhastigheder må den lavfrekvens støj ikke overstige 20dB. Lavfrekvens støj har en frekvens på mellem 10-160Hz. For målingerne skal det dog siges, at målingerne for vindmøllerne kan være upræcise, da det er umuligt at sortere baggrundsstøjen fra omgivelserne fra.



Ved støjgrænserne mellem 37-44dB er der ikke fare for direkte høreskader. En lydstyrke på 44dB er tilsvarende en hvisken på en afstand af 30cm, så at være udsat for denne lydstyrke vil ikke have direkte konsekvenser for ens hørelse. De lavfrekvente lyde er ikke så almindelige i omgivelserne hvilket gør, at de kan virke mere forstyrrende for hørelsen. Grænseværdien på 20dB svarer til en 3,6MW vindmølle på 1800 meters afstand, så færden tættere på møllerne kan forekomme irriterende.

For tiden bliver der investeret i store landbaserede vindmøller. I perioden mellem 2004 og til 2015 er der blevet opført 465 produktionsmøller i Danmark med en kapacitet på mellem 2MW til 3,6MW, hvilket har været hovedparten af nye landbaserede vindmøller. Netop for denne størrelse af landbaserede vindmøller er der blevet foretaget målinger og beregninger for at se, om de holder sig indenfor regulativerne omkring støjniveau. Bilag X viser, hvordan forskellige vindmøller indenfor størrelsesordenen 2MW til 3,6MW holder sig under grænsen på 44dB for almindelig støj ved et åbent miljø, men det kan ikke måles præcist nok, hvorvidt de holder sig under grænsen for lavfrekvens støj, så dette skal derfor beregnes. Tabel X angiver de beregnede værdier indenfor de danske regulativer, hvad angår lavfrekvens støj indendørs ved husstande:

Frekvens (Hz)	10	16	31,5	63	125	160
dB	-2	-2	5,5	12,5	17	21,5

Ud fra dette kan det ses, at den lavfrekvente støj ikke overskrider støjgrænsen på de 20dB før enden af det lavfrekvente spekter på 160dB nås.

Udledningen af støj fra vindmøller kan inddeles i to kategorier; mekanisk og aerodynamisk. Den mekaniske støj stammer fra de bevægelige mekaniske dele ved selve vindmøllen f.eks. generator, gearboks og køleblæser. Denne type støj kommer i form af tonal støj, hvilket kan forekomme mere irritabelt for hørelsen, da det adskiller sig fra naturlige toner. Aerodynamisk støj forekommer hovedsageligt, når vindmøllevingerne bevæger sig gennem luften. Herved dannes der luftstrømme, som fremkalder en karakteristisk susende lyd. Den aerodynamiske støj følger en bredbåndslid, hvilket forekommer ved frekvenser på højere end 100Hz.

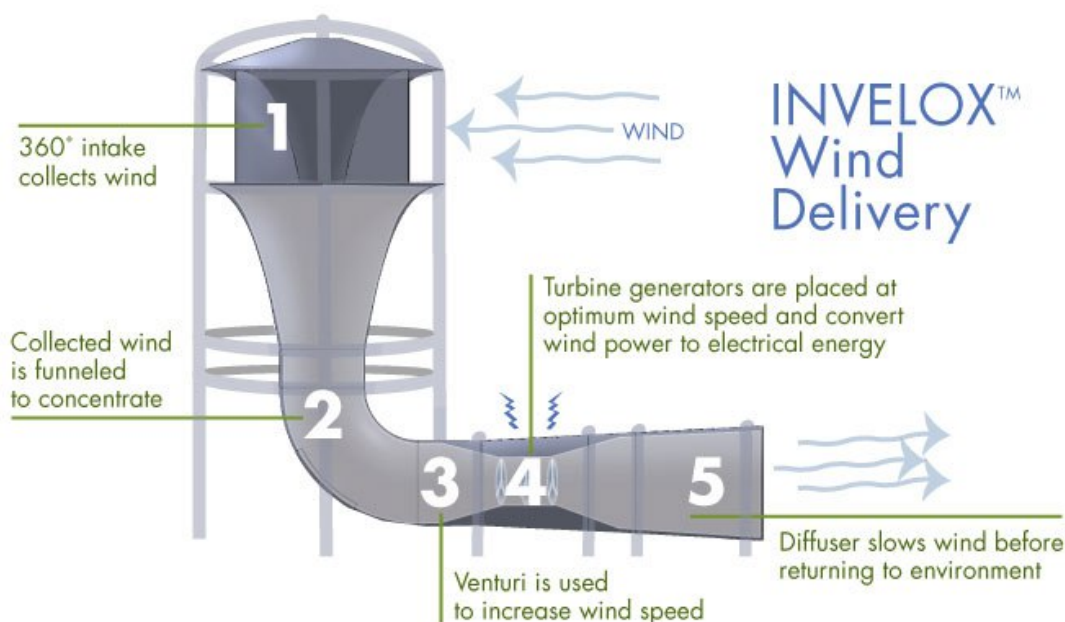
Ulemper ved placering af vindmøller Vindmøllerne står overfor et problem omkring placeringen af nye vindmøller, i takt med at der bliver flere mennesker og overbefolkning bliver et problem. Det vigtige er at er i fremtiden ikke vil være plads til at have begge i en sikkerhedsmæssig afstand til hinanden. Så man må stille spørgsmålet er vindmøller en bæredygtig energikilde? Man må undersøge nye placeringsmuligheder, her er havvindmølleparker blevet det store 'go-to'. Et fænomen omkring vindmøller, som viser sig både at være en force og en ulempe er at størrelsen af vindmøllen er proportionel med den energi som vindmøllen producerer. Her bliver placering og larm igen et problem, da vindmøllerne larmer mere og skal have mere plads. Her har Sheerwind kommet med deres ide til en ny vindmølleteknologi, Invelox er ifølge deres hjemmeside den perfekte løsning, den larmer ikke, optimerer udnyttelsesgraden af kraften i vinden, og ved designet kan den placeres ovenpå evt. højhuse. I takt med at vores 'mangel' på plads kunne man udnytte Invelox'en. Problemet med Invelox er, at teknologien ikke er færdigudviklet og der ikke er nogen af licenskøberne, som har kunne få projektet til at virke til de standarder som Sheerwind har udtalt.

Slagelse kommune

Slagelse kommune har investeret i Invelox i forbindelse med en lokal produktion af brint i Energi-Park Korsør. Sheerwind producerer ikke selv Invelox, men sælger derimod produktionsrettighederne til andre lokale firmaer. E-Venturi A/S købte i 2014 produktionsrettighederne til Invelox til en værdi af 3,2 millioner kroner. Ud af de 3,2 millioner kroner fik EUE (Energy Universe Europe) aps 600.000 kroner til formidling af projektet, færdiggørelse af kontrakten derudover skulle EUE aps fungere som rådgivere. E-Venturi manglede fra produktionens start, meget information omkring Invelox-systemet. Dette resulterede i Invelox-systemer, som ikke fungerede. E-Venturi A/S henvendte sig herefter til Sheerwind for at få hjælp til færdiggørelsen af Invelox-systemerne, men dette ville Sheerwind have yderligere betaling for. Desuden har Slagelse kommune manglet validt data på Invelox, da der ikke findes en fuld skala model. Derfor nedsatte Slagelse Kommune, i samarbejde med EUE aps, i december 2016 et fagpanel med otte personer, som skulle få adgang til fortrolige data og informationer fra Sheerwind. Disse otte personer har Slagelse kommune og EUE aps ikke ønsket at offentliggøre. Der er dog endnu ingen ny data til rådighed. Hermed står Slagelse kommune indtil videre tilbage med et produkt, som ikke fungerer.

Intro til Invelox

I 2011 fik virksomheden Sheerwind patent på et system kaldet Invelox. Invelox skulle i teorien være bedre og kræve mindre plads end de konventionelle vindmøller. Ifølge Sheerwind larmer de så lidt at de vil være anvendelige i f.eks. byer. Dette vil skabe helt nye muligheder, da dette ikke er muligt hos de konventionelle vindmøller. I 2016 oprettede tre forskellige testcentre. Et i USA, Kina og et i Danmark. Sheerwind's Invelox bygger på en idé om at maksimere energi udbyttet fra vinden ved at hæve vindhastigheden. Deres patenterede design består af fem trin:



Første trin er et 360 graders luftindtag med vægge fordelt hele vejen rundt, så det er muligt at opsamle vind fra alle vinkler. Vinden ledes ned til andet trin hvor vinden bliver koncentreret, hermed hæves vindhastigheden. I tredje trin indsnævres røret yderligere og dermed opnås den

optimale vindhastigheden. I fjerde trin er turbinerne som omsætter vinden til elektrisk energi ved hjælp af en generator. I femte trin bliver vindhastigheden sænket ved hjælp af en diffuser og bliver herefter ledt ud af Invelox-systemet igen.

Relation til samfund

Udnyttelse af vindenergi har været en af de mest efterforskede områder indenfor vedvarende energi i Danmark. Det skyldes netop Danmarks suveræne geografisk placering, som har en lang kystlinje og dermed mange ideelt sted hvor vindmøllerne kan udvinde energi fra, eksempelvis vestkysten. I forhold til andre vedvarende energi, er vindmøller efterhånden en meget modne teknologi, hvor effektivitetens grad er så høj at det er realistiske at erstatte fossilbrændstof. Eksempelvis, for en alminlig solcelle ligger virkningsgrad typisk på 14-16 procent, hvorimod for en almindelig vindmølle ligger virkningsgrad hel op på ca. 30 procent.

Trods af den høje virkningsgrad og udbredelsen, så har vindmøller også nogen udfordringer foran sig, en af de største problem, er nemlig begrænsning i placering af møllerne. Vindmøller forudsager masse støj til nærliggende nabolaget pga. de mange bevægende del og mekanisk bevægelse. Det er især talt om en lydforurening af lavfrekvens støj eller indfralyd. Luftens ringe absorptions evne over for lavfrekvens støj bevirker til en større spredning af støjet i forhold til højfrekvens støj. Lavfrekvens støjs egenskab gør også at den ikke blot gener udendørs, men også indendørs. Hvis støjen ligger på maksimal tilladt niveau efter den danske lovgivning, betyder det at der stadig er risiko for man bliver generet af støjen indendørs. Den elektriske effekt som skabt af møllen er proportional med skabt støjniveau, dvs. at jo større møllen er og jo mere effekt den producerer, desto mere lammer den over et større areal. Denne egenskab skaber dermed en kæmpe begrænsning for placeringer af vindmøllerne. Vindmøllerne bliver eksempelvis kun etableret ude på landet, på kystlinjen eller ud i havet.

Et anden problem er også at vindmøllens effekt er proportional med dens størrelse. Dermed betyder det også at Hvis vi kaster blik på en hurtigløber, den mest anvendt vindmølle typer i Danmark, så kræver det at vindstyrke når et relativt højt niveau før der kan udvindes energi fra vindstrømningen. Siden vindhastighed stiger, jo længere man er fra jorden, betyder det også at de flest af vindmøllerne er nødvendigvis være høj og stor, dette vil igen lede til en begrænsning ved placering af møllerne.

Efter regeringsplanen, som har sæt mål for en CO2 neutral Danmark til 2050, er det vigtigt at finde andre effektiv måde at anvend vindenergi på, som skal dække over de områder hvor konventionel vindmøller ikke er muligt at anvend. Den nye koncept, Invelox, som Amerikansk firma SheerWind står med, vil måske bryde igennem de begrænsninger som nutidige vindmøller står over for og giver udnyttelse af vindenergi et nyt perspektiv. I forhold til en konventionel vindmølle, har Invelox den fordel at, det ikke lammer lige så meget som en normal vindmølle vil gøre, pga. den mekaniske opbygning. Dens egenskab til at accelerere vindhastigheden, ved hjælp af et højere tryk, betyder også at sådan en Invelox system ikke behøver at være lige så stor og høj, som en konventionel vindmølle. Derved kan problematikken om støj og skygning af andre bygning, undgås. Det vil så giv mulighed for at indfør sådan et system ind i byerne, som eksempelvis Slages kommune prøvede at indfør ved Korsør.

Et andet problematik som Invelox vil være en løsning til, er de svingende produktion som bæredygtig energikilde typisk har. Invelox kan nemlig opfange vind fra 3 m/s og anvend dem til produktion af energi, hvorimod for en vindmølle kræver det en hastighed på 12-14 m/s for at producer maksimal effekt. Denne egenskab betyder at vindenergi måske kan blive til en mere kontrollerbar energikilde, end andre bærdygtigkilde, såsom solenergi.