

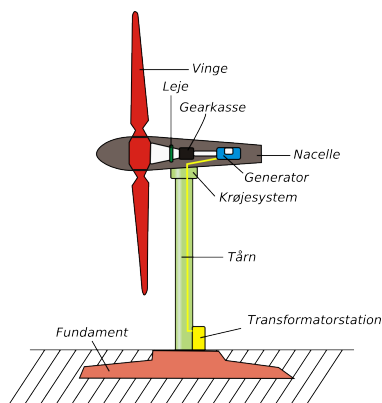
Vindmøller

Robert Jensen, Nanoteket

Marts 2008

1 Hvad er en vindmølle?

En vindmølle er et apparat, som kan tage energi ud af vinden og lave den om til et mekanisk arbejde, vi kan udnytte til vores egen fordel. Det kunne for eksempel være til at male korn eller pumpe vand, men nu om dage bruges møllen næsten altid til at trække en generator som laver elektricitet.

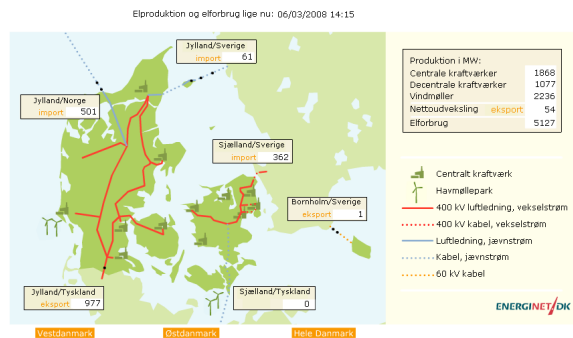


Figur 1: Schematisk oversigt over komponenterne i en vindmølle.



Figur 2: En moderne vindmølle. I dette tilfælde en Siemens 3.6 MW.

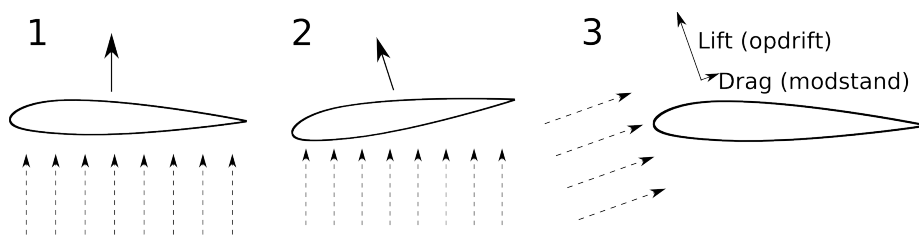
En moderne vindmølle består af en række hovedkomponenter, som er angivet på figur 1. Møllen består af et tårn, som er fastgjort til jorden på et fundament, som normalt er lavet af beton. Oven på tårnet er selve møllehatten, som normalt kaldes nacellen. Inden i nacellen finder vi generator og gearkasse. Forrest på nacellen finder vi rotoren, som normalt består af tre vinger, som er fastgjort på et nav. Når vinden blæser, drejer rotoren rundt og trækker generatoren, strømmen herfra kommer igennem en transformatorstation, hvorefter den kan sendes ud på elnettet, hvor strømmen er til rådighed for forbrugerne. Mellem tårnet og nacellen sidder et leje, som gør, at nacellen kan dreje omkring tårnet. Dette kaldes at *krøje* møllen, og systemet, som udfører bevægelsen, kaldes derfor krøjesystemet.



Figur 3: Fordelingen af produktionsmetoder til elektricitet en dag i marts 2008.

Selvom det naturligvis koster en hel del energi at producere en vindmølle, er den alligevel en god forretning, rent energimæssigt. En vindmølle bruger cirka seks måneder på at producere al den energi det tager at producere, montere, servicere og til sin tid fjerne møllen igen. Da møllen har en levetid på forventet 20 år betyder det, at møllen producerer cirka 40 gange så meget energi, som den koster. En gennemsnitlig moderne vindmølle på en god placering vil i løbet af sin levetid spare naturen for omtrent 150.000.000 kg CO₂. I Danmark leveres gennemsnitligt cirka 20% af elproduktionen af vindmøller. På figur 3 ses fordelingen af produktionsmetoder en dag i marts 2008. Det ses, at det var en meget blæsende dag, da vindmøller den dag stod for næsten 50% af elproduktionen. Den danske produktion af vindmøllestrøm er faktisk så stor, at den om natten, hvor strømforbruget er lavt, nogle gange er større end forbruget. I disse situationer er Danmark nødt til at sælge vindmøllestrømmen meget billigt til udlandet.

1.1 Hvorfor drejer rotoren rundt?



Figur 4: Vingens aerodynamik. De stiplede pile angiver den relative vindhastighed set fra vingen. De fuldt optrukne pile angiver de kræfter, der virker på vingen. Vingens rotationsretning er mod venstre i papiret. Vinden kommer ind nedefra og bevæger sig op langs papiret.

Når man ser på en vindmølle, kan man let komme til at undre sig over, hvorfor vingerne overhovedet drejer rundt. Vinger er normalt noget vi kender fra fly, men på fly vender vingerne parallelt med flyveretningen, hvorimod en vindmølle har vingerne stående i en ret vinkel mod vinden. Forklaringen skal findes i, at

vindhastigheden set fra vingens synspunkt ikke kommer lige forfra, men nærmere ind langs vingens kant. For at forstå konceptet kigger vi på figur 4. På figuren skal vi forestille os, at vi kigger ned på møllen lige ovenfra, den ene vinge peger lodret op i luften og vi ser derfor tværsnittet af vingen. Vinden kommer i alle tre figurer ind nedefra, altså langs papirets højde. Til venstre (1) ses vingen i normal driftsposition. Vingen står imidlertid stille og vinden har derfor ikke anden virkning end at presse vingen bagud. Vinden udøver altså en kraft, som forsøger at knække vingen, men ikke nogen kraft, som forsøger at dreje den rundt. For at komme ud af denne situation og i stedet få møllen i drift, drejer vi i (2) vingen en lille smule (dette kaldes at *pitche* vingen), så den kommer til at stå skråt på vinden. Det er vigtigt at lægge mærke til, at det altså kun er vingen som drejer, nacellen peger stadig lige op i vinden, men vingen står nu en lille smule skråt i forhold til nacellen. Fordi vingen står skråt, peger den resulterende kraft fra vinden på vingen nu ikke kun bagud men også en lille smule til venstre, altså i rotationsretningen. Vinden vil nu bringe vingen til at rotere. Når først vingen er oppe i fart, har vi igen en ny situation (3). Da vingen nu selv bevæger sig, vil vinden set fra vingens synspunkt ikke længere komme lige forfra, men derimod skråt fra siden. Jo hurtigere møllen snurrer rundt, jo mere vil møllen opleve, at vinden kommer fra siden og ikke forfra. Den skrå indfaldsvinkel af vinden gør, at vingen nu kan pitches tilbage til udgangspositionen, men alligvel stadig påvirkes af en kraft, som drejer vingen rundt. Det er vigtigt at lægge mærke til, at vingen selv i optimal driftsposition påvirkes af langt større kræfter i bagudrettet retning, end i rotationsretningen. Den kraft som forsøger at vælte møllen er altså langt større, end den kraft som drejer vingerne rundt.

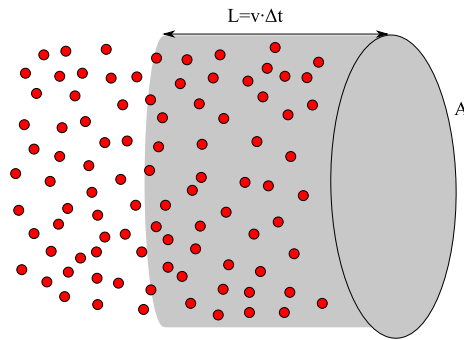
2 Effektkurver

Det er åbenlyst, at en vindmølle er i stand til at producere mere strøm, jo mere vinden blæser. Men hvor meget mere strøm, den helt præcist kan producere, kommer an på en lang række forhold. Først og fremmest må vi naturligvis se på, hvor meget energi, der faktisk er i luften. Ser vi først på et enkelt luftmolekyle, vil dets energi være givet ved den kinetiske energi af molekylet, $E = \frac{1}{2}mv^2$, og man kunne derfor tro, at energiindholdet i luften går med vindhastigheden i anden potens. Imidlertid sker der jo også det, at jo kraftigere vinden blæser, jo flere luftmolekyler vil også passere vindmøllens rotor pr. sekund. Som det ses på figur 5 stiger antallet af luftmolekyler proportionalt med vindhastigheden. Totalt set får vi altså, at energien i vinden går proportionalt med vindhastigheden i tredje potens: $P_{vind} = k_1 \cdot v \cdot \frac{1}{2}mv^2 = k_2v^3$. Hvor k_1 og k_2 er konstanter, som vi endnu ikke kender værdien af. Dem kan vi imidlertid let finde. Energien af det rumfang luft, som er markeret på tegningen må være givet ved $E = \frac{1}{2}\rho V \cdot v^2$. Størrelsen af voluminet V er givet ved: $V = A \cdot L = Av\Delta t$ og den totale energi i vores udvalgte rumfang luft er altså:

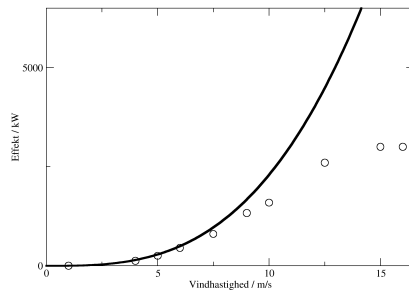
$$E = \frac{1}{2}\rho Av^3 \cdot \Delta t \quad (1)$$

Ønsker vi at kende effekten dividerer vi med tiden på begge sider og får:

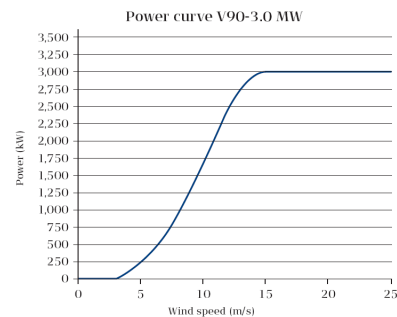
$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$



Figur 5: Mængden af luft, som passerer rotoren, stiger proportionalt med vindhastigheden.



Figur 6: Den maksimale effekt, som kan trækkes ud af en rotor på 90 m i diameter. De åbne markeringer viser punkter af kurven i figur 7.



Figur 7: Effektkurve for en Vestas 3 MW-vindmølle med en rotordiameter på 90 m.

En vindmølles effektivitet skal nu vurderes ud fra, hvor stor en del af vindens effekt, den kan lave om til elektrisk strøm. Da møllen tager energi ud af vinden vil vindhastigheden langt foran rotoren være større end vindhastigheden på bagsiden af møllen. Jo mere møllen bremser luften, jo langsommere vil vinden bevæge sig på bagsiden af møllen. Hvis møllen var 100% effektiv ville vinden faktisk stå stille, og der vil derfor ikke være plads til, at mere vind kan komme forbi rotoren, og møllen vil ikke producere strøm. Derfor må der findes et optimum, hvor møllen tager maksimalt megen energi ud af vinden, men samtidig efterlader vinden med energi nok til at bevæge sig væk fra rotoren. Man kan vise, at dette optimum er 59%. Det er altså ikke muligt at lave en vindmølle, som høster mere end så meget af vindens energi. Hvis møllen er perfekt, forventer vi derfor, at den totale effekt, som møllen kan producere ved en given vindhastighed, er:

$$P_{optimal} = 0,59 \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Den teoretiske effektkurve ses i figur 6. Til sammenligning ses i figur 7 effektkurven for en Vestas 3 MW mølle. Det ses at den virkelige mølles effektkurve for lave vindhastigheder er næsten sammenfaldende med den teoretiske effektkurve. Møllen udnytter altså vinden næsten optimalt ved vindhastigheder under ca.

12 m/s. Over denne vindhastighed flader den virkelige kurve ud og forbliver konstant på 3 MW. På en meget blæsende dag, hvor det måske blæser i nærheden af 20 m/s er møllen altså kun i stand til at udnytte en ganske lille del af vindens effekt. Dette skyldes ganske enkelt, at konstruktøren af møllen har besluttet sig for, at det ikke økonomisk kan betale sig at bygge møllen så kraftig, at den kan holde til at producere en så stor effekt. Så når det blæser meget, nøjes møllen simpelthen med kun at hive 3 MW ud af vinden og lader resten passere. På den måde opnår man et nogenlunde optimalt kompromis mellem møllens elproduktion og den pris, det koster at producere og montere møllen.

3 Optimering af produktion

For at få så stor en elektrisk produktion som muligt, er man naturligvis hele tiden nødt til at sørge for, at møllen har optimale vilkår at arbejde under. Ud over helt åbenlyse ting, såsom at de bevægelige dele er ordentligt smurte og at vingerne er rene, vil det vil først og fremmest sige, at man sikrer sig, at møllen hele tiden peger lige op i vinden. Det lyder måske ikke så svært, men i virkeligheden er det en relativt kompliceret proces. Først og fremmest er det ikke en helt simpel sag i det hele taget at rotere hele nacellen som typisk vejer mere end 140 tons. Men derudover er det faktisk heller ikke helt let at finde ud af, hvor vinden faktisk kommer fra. Det er let at mærke på en almindeligt blæsende dag, at vinden sjældent er hel jævn. Den har det som regel med at komme fra lidt forskellige retninger, især hvis man er i et område med mange bakker, træer eller huse. Møllen kan ikke dreje (krøje) særlig hurtigt, og det er derfor nødvendigt for den at placere sig i en nogenlunde optimal position i forhold til den aktuelle, gennemsnitlige vindretning. Som om det ikke var slemt nok, kommer der yderligere den komplikation, at rotoren er meget stor, typisk mindst 80 meter i diameter. Man kan derfor let komme ud for, at vindretningen ikke er den samme hele vejen op langs rotorens højde. I praksis måler man vindretning bag ved rotoren, altså i navhøjde, og vindretningen over og under det punkt kender man faktisk ikke. Det vil derfor være meget sjældent, at rotoren peger perfekt op imod vinden. Som tommelfingerregel siger man, at man må leve med en krøje fejl på cirka 5 grader. I øvelsen skal I prøve at måle, hvor stort et tab i elproduktionen sådan en fejl kan give anledning til.

4 Sikring mod overbelastning

En moderne vindmølle er meget stor, og det er derfor både sikkerhedsmæssigt og økonomisk helt afgørende vigtigt, at møllen ikke går i stykker. Mange fejl er af ren økonomisk art. For eksempel giver en defekt gearkasse normalt ikke sikkerhedsmæssige problemer¹, hvorimod eksempelvis en fejl i vingen kan give anledning til store ødelæggelser, hvis vingen river sig løs under drift.

¹Dog så man i februar 2008, at en ødelagt gearkasse potentielt kan føre til et totalt haveri af møllen.

4.1 Egenfrekvenser

Alle stive legemer kan svinge med en bestemt frekvens, som kaldes *egenfrekvensen*. Prøv for eksempel at holde en lineal fast til bordet i den ene ende og lad den stikke så langt som muligt ud over bordkanten. Hvis du nu trykker linealen lidt ned og slipper den igen, vil den stå og svinge op og ned. Jo længere linealen er, jo langsommere vil den svinge; så hvis du tager linealen et stykke ind på bordet og eksempelvis lader halvdelen stikke ud over kanten, vil du opleve, at den nu svinger hurtigere op og ned. Et vindmølletårn har på samme måde en egenfrekvens, og som med linealen gælder det, at jo højere tårnet er, jo lavere er egenfrekvensen. En vindmølles rotor er ikke fuldkommen perfekt afbalanceret, og når rotoren drejer rundt, vil den derfor trække en lille smule i tårnet på vejen rundt, det betyder at tårnet hele tiden står og svinger lidt frem og tilbage i takt med rotoren. Denne effekt er normalt ikke noget problem; tårnet er bygget til at kunne tåle denne belastning. En situation, som meget let kan ødelægge en mølle, er derimod, hvis møllens rotorfrekvens bliver sammenfaldende med tårnets egenfrekvens. I den situation vil rotorens svingning lige præcis følge tårnets naturlige svingningsbevægelse og svingningen vil for hver rotation blive større og større og vil i løbet af kort tid ødelægge tårnet.

Den letteste måde at undgå denne situation på er, at sørge for, at tårnets egenfrekvens er så høj, at rotoren ikke kan rotere så hurtigt, at den rammer egenfrekvensen. Da tårnets egenfrekvens imidlertid falder med højden af tårnet, sætter denne teknik en begrænsning på, hvor høje tårne, man kan lave (i omegnen af 100 meter). Vil man have højere tårne end dette, må man leve med, at rotoren principelt kan risikere at ramme tårnets egenfrekvens, og man må så søge at undgå den situation på anden vis.

5 Øvelsesprogram

I øvelsen skal vi måle på forskellige parametre på en vindmølle.

Aerodynamik: Ved hjælp af helt simple midler (pap og klisterbånd) skal I prøve at se, hvad udformningen af vingen har af betydning for møllens ydelse. I skal måle effekten af en rotor med rene pladevinger og med en rotor I har gjort mere aerodynamisk ved hjælp af pap. Husk på, at på en virkelig vindmølle er det meget vigtigt at undgå, at vingerne bliver for brede, da det vil medføre at møllen bliver ekstremt tung, og derved alt for dyr. Prøv derfor at se, hvor gode I kan gøre vingerne, uden at gøre dem meget brede.

Effektkurven: Effektkurven er måske den vigtigste parameter overhovedet for vindmøllen, da det er den, som fortæller os, hvor meget strøm, vi faktisk er i stand til at producere. Vi måler effektkurven i vores vindtunnel ved simpelthen at registrere effekten ved en række forskellige vindhastigheder. Når I har målt effektkurven, skal I skønne, hvor meget strøm jeres mølle ville kunne lave, hvis den kørte hele året, og hvor meget den ville kunne lave, hvis rotoren var større. Til beregningen, kan I vælge at tage højde for, at vores generator ikke er særlig effektiv. Som tommelfingerregl kan I

gå ud fra, at kun 25% af den energi, som vingerne afsætter i generatoren, bliver til strøm. Resten afsættes som varme i generatoren. På en ægte vindmølle er effektiviteten af generatoren bedre end 95%.

Tårnsvingninger: Vi måler, hvor meget tårnet svinger som funktion af rotorfrekvensen. På den måde ser vi, at tårnet svinger meget voldsomt, når vi rammer egenfrekvensen. Ved at prøve med forskellige tårnhøjder, ser vi, hvordan egenfrekvensen falder, når tårnet bliver højere. Vi foretager målingen ved at montere vindmøllen på et tårn lavet af træ, som vi har monteret med såkaldte *strain gauges*, som er måleapparater, som kan måle deformationen af tårnet.

Krøje fejl: Som nævnt har alle møller krøje fejl; det er simpelthen umuligt at rette rotoren perfekt op i vinden. I denne øvelse vil vi prøve at måle hvor stort et tab i elproduktionen, sådan en fejl giver. Vi foretager målingen ved hjælp af en blæser og et drejeligt tårn. Start med at placere møllen helt ude af vinden ($\theta = 0^\circ$) og drej så i trin af 10 grader møllen ind i vinden og derefter ud af vinden igen til den anden side ($\theta = 180^\circ$). Noter for hver drejning, hvad elproduktionen er ved den pågældende vinkel. Når målingen er færdig skal I fite jeres resultater på jeres lommeregner. Vi forventer, at resultatet går som $\sin^n(\theta)$. Hvis n har værdien 1 falder effektiviteten af møllen simpelthen svarende til det mindskede areal af rotoren. Hvis n har værdien 3 skal vi nærmere tolke det sådan, at møllen effektivt set ser en lavere vindhastighed, når møllen står skævt på vinden. Når I har fundet den rette værdi, skal I beregne, hvor stort tabet for en mølle på 2,3 MW vil være, hvis møllen har en krøje fejl på 5 grader.

Da vi kun har én vindtunnel, er det ikke sikkert, at alle hold når at måle både effektkurver og tårnsvingninger. I løbet af øvelsen vil de enkelte hold komme ind til vindtunnellen, mens de andre hold arbejder med at lave de hjemmelavede rotor og måle deres effekt for forskellige udformninger af vingen. Alle hold måler også betydningen af krøje fejl, da denne måling kan laves med en almindelig blæser og derfor ikke behøver adgang til vindtunnellen.

6 Opgaver

1. Traditionelt angiver man størrelsen af en rotor ved dens diameter og ikke dens areal. Omskriv ligning 2 så effekten angives som funktion af rotordiameter.
2. Gennemfør omskrivningen af udtrykket for E , der leder til ligning 1. Vink: Indsæt udtrykket for V .
3. Hvor lang tid tager det for en vindmølle på 3 MW at producere strøm nok til at dække en gennemsnitlig families totale elforbrug i et år?
4. Hvad kan man gøre, hvis man ønsker at gemme overskudstrøm i perioder med stor elproduktion fra vindmøller?

5. Energien af et roterende objekt kan beregnes, hvis man kender objektets såkaldte *inertimoment*, I , via udtrykket

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (4)$$

En mellemstor moderne vindmøllerotor har et inertimoment i størrelsesordenen $I = 9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Rotoren kører med omtrent 18 omdrejninger pr. minut. Hvor meget energi er ophobet i rotoren?

6. Find et billede af en vindmølle på internettet og prøv at beregne, hvor stor en del af rotorenplanen, som faktisk er fyldt med vinge, dette tal kaldes rotorens *soliditet*. Prøv at forklare, hvordan møllen kan nøjes med et så lille vingearreal.
7. Vi ser nu på en idéel vindmølle. Den udnytter altså vinden efter udtrykket i ligning 3, møllen kan maksimalt yde 2,5 MW. Rotorarealet er 6000 m^2 .

- (a) Ved hvilken vindhastighed, v_{max} , yder møllen sin maksimale effekt?
- (b) Vi forestiller os nu, at der i lang tid har været en vindhastighed på $v_{stabil} = 9 \text{ m/s}$. I en periode på 20 sekunder passerer vindmøllen af et vindstød med hastigheden $v_{std} = 14 \text{ m/s}$. Hvor meget energi går tabt, fordi møllen kun kan producere 2,5 MW?
- (c) Det kunne være ønskeligt at gemme energien fra vindstødet til senere, således at energien ikke er tabt. Dette kunne eksempelvis ske, ved at lade rotoren rotere hurtigere mens vindstødet står på, og derefter trække energien ud af rotoren, når vindhastigheden igen er faldet til under v_{max} . Hvis møllen roterede med 18 omdrejninger pr. minut før vindstødet, hvor hurtigt vil den så skulle rotere umiddelbart efter vindstødet for at gemme al energien? Dette princip med at gemme energi kortvarigt i vindmøller anvendes i næsten alle moderne vindmøller. Man siger, at møllen er af 'variabel hastigheds'-typen i modsætning til ældre møller, som kaldes 'konstant hastigheds'-typer.