

Sådan fungerer en vindmølle

En vindmølle er en mekanisk indretning, som omsætter bevægelsesenergien i den luftstrøm, der passerer vindmøllens propel – også kaldet »rotoren« - til elektrisk energi. Selve vindmølleprincippet – at trække mekanisk energi ud af vinden – har været kendt i århundreder.

Det store teknologiske spring fremad i forhold til de første elproducerende vindmøller kom, da man udstyrede rotoren med aerodynamisk udformede vinger. Den viden blev hentet fra flyindustriens udvikling af flyvemaskinevinger. Populært sagt udnytter en mølle med aerodynamiske vinger ikke blot vindens tryk på et skråtstillet blad, men den udnytter, at luftstrømmen omkring vingen skaber et undertryk på vingens bagside i forhold til vinden. Den resulterende kraft fra dette undertryk fordelt over hele vingen giver dét træk, som får vingen til at rotere.

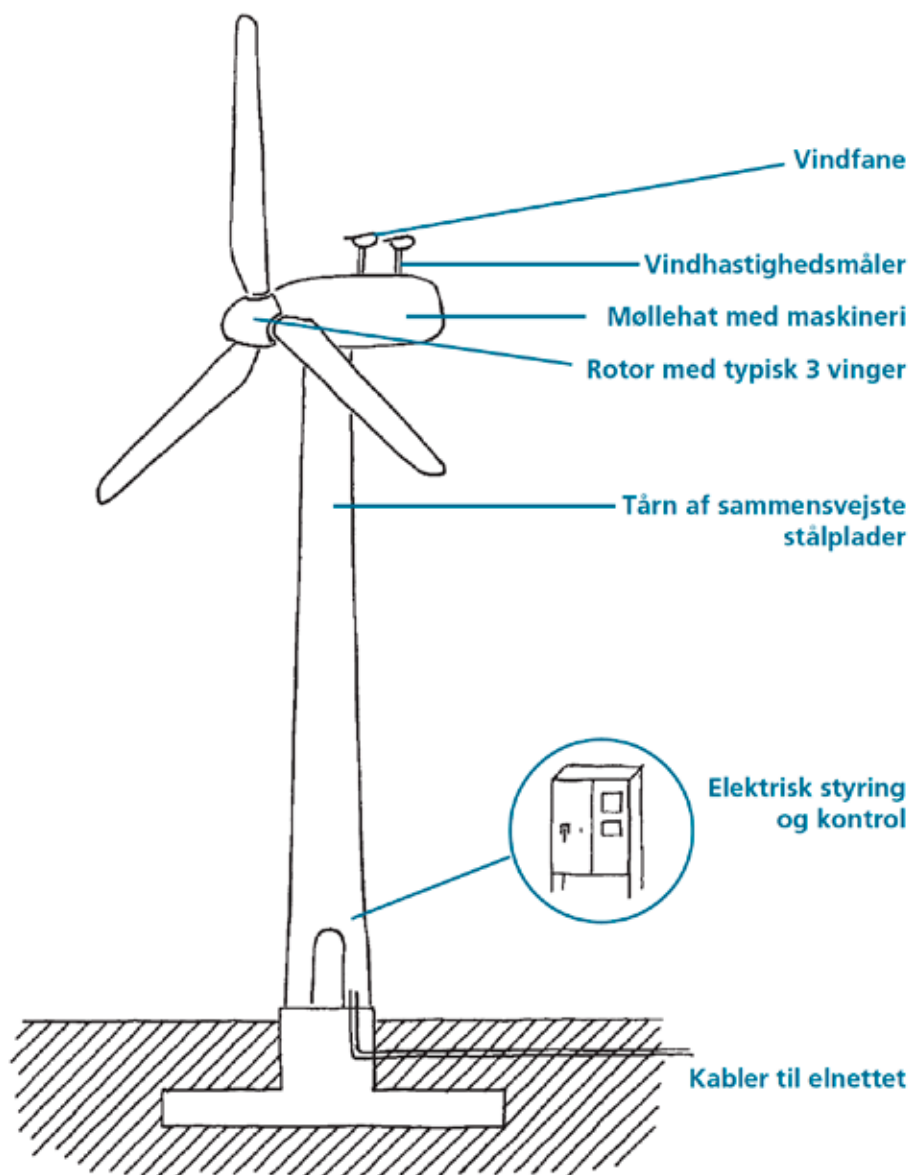
Tegningerne nedenfor viser luftstrømmene omkring en vinge og de kræfter, der opstår. Ved højere vindhastighed opstår større kræfter på vingerne, og ved vindhastigheder på omkring 12-14 m/s skal kræfterne begrænses, for at holde møllens effekt på en forudbestemt maksimal effekt. Dette sker enten ved at lade vingerne stalle (udtales stårle) eller ved at dreje vingerne (pitche). Luftens strømning om vingerne er forskellig for disse to reguleringsprincipper (se skitserne næste side).

Bemærk, at dét, som på en flyvinge er oversiden af vingen, er bagsiden af vindmøllevingen i forhold til den retning, vinden kommer fra.

På de følgende sider opridses, hvordan vindmøllen fungerer fra start til stop.

Møllen stiller sig ind i vinden

Det har været vindstille og det begynder at blæse op. Følgende sker: Møllens vindfane retter sig ind efter vinden, nøjagtigt som en vejrhane. I enden af vindfanens lodrette aksel er en sensor, som aktiveres, når vindfanen ændrer retning. Sensoren giver signal til at starte krøjemotoren (se maskintegningen på side 3), som drejer hele kabinen, så rotoren ven-



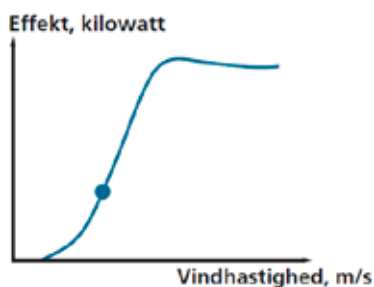
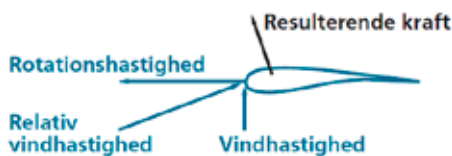
der op imod vinden. Vinden blæser nu omtrent vinkelret ind på rotoren.

Ved en vindhastighed på ca. 4 meter pr. sekund begynder rotoren langsomt at dreje rundt, og det sker først og fremmest på grund af vindens tryk på vingerne. Møller, som har drejelige vinger, har lettere ved at starte, idet vingerne kan indstilles til størst muligt drejningsmoment ved lav vindhastighed. Så snart

rotoren begynder at dreje lidt, begynder aerodynamikken omkring vingeprofilen at virke, og det resulterer i større kræfter og øget rotationshastighed.

Når rotoren opnår en forudberegnet hastighed, vil vindmøllens generator, som gennem et gear er i forbindelse med rotoren, have nået sin fastsatte indkoblingshastighed.

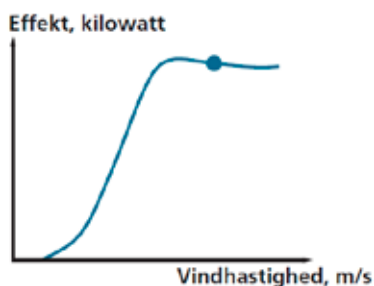
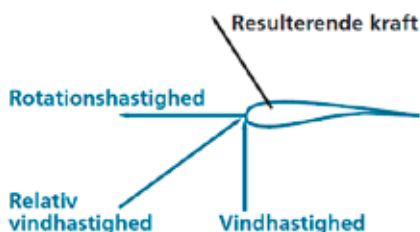
Stall og pitch. Lav vind. Profil uden hvirveldannelse



jere vindhastighed, som rammer rotoren, begynder at forstyrre luftstrømningen omkring vingeprofilen, så undertrykket på bagsiden bliver mindre.

Hvis man sammenligner med vingen på et fly, svarer det til, at flyet går for stejlt op i forhold til den fremadgående hastighed, så vingen »staller«. Flyet taber højde og falder ned, hvis ikke det rettes op til vandret og/eller hastigheden øges. For et fly er »stall« en utilsigtet og farlig tilstand. For vindmøllen er »stallet« dét, som sikrer møllen mod overbelastning.

Stall. Høj vind. Profil med hvirveldannelse

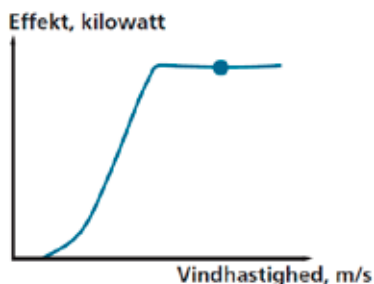
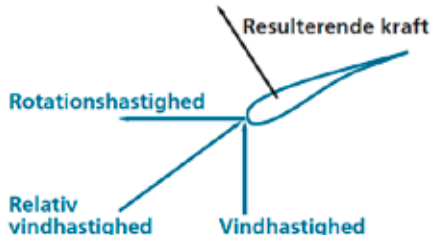


Pitch regulering

En pitch-reguleret mølle kan dreje vingerne om en akse i vingens længderetning. Når møllen ved stigende vindhastighed har nået sin maksimale effekt, drejes vingerne således at indfaldsvinklen af den relative vindhastighed på profilet mindskes. Herved reduceres den resulterende kraft uden at vingen staller, og effekten kan holdes nede på den ønskede værdi.

Møllens styring sørger hele tiden for, at vingerne drejes til den optimale indstilling.

Pitch. Høj vind. Profil uden hvirveldannelse



Variabel omdrejningshastighed

Alle nye, større møller har i dag variabel omdrejningshastighed. Omdrejningshastigheden reguleres ved hjælp af en frekvensomformer, således at den frekvens, generatoren skal køre med, bestemmes af møllens styring. Herved kan man optimere møllens produktion i forhold til den aktuelle vindhastighed.

Møllen kobles fra, når vindhastigheden bliver for høj eller for lav. Møllen vil fortsætte med at producere omkring sin »mærkeeffekt« selv ved ret høje vindhastigheder. Men alle møller er indrettet, så de kobles fra nettet og bringes i sikker tilstand, hvis vinden i længere tid når over »stopvinden«. Denne vindhastighed er forud fastsat for den enkelte vindmølle og ligger normalt på 20-25 meter pr. sekund. Den overvåges af møllens styring via vindmåleren.

På en moderne mølle standses møllen ved at dreje vingerne ud i 90° hvilket bringer hastigheden ned, hvorefter møllen kobles fra nettet, og møllen stoppes eller roterer meget langsomt. Der bliver møllen, indtil vindhastigheden falder noget under »stopvinden«. Det er sjældent, det blæser så kraftigt.

Møllens skivebremse anvendes kun ved stop af møller med fast monterede vinger. Normalt falder vinden – efter at have blæst med en vis styrke – til under 4 meter pr. sekund. I det øjeblik dette

Den relative vindhastighed er sammensat af vindhastigheden og rotationshastigheden og er den vindhastighed i størrelse og retning, vingen oplever.

Møllen kobles ind på elnettet

Vindmøllens styring sørger i dette øjeblik for, at møllens generator kobles til elnettet.

Hvis det nu blæser yderligere op, vil vinden forsøge at køre rotoren op i et endnu højere omdrejningstal. Det har den svært ved, for efter at generatoren er koblet til nettet, er den underkastet nettets frekvens. På et vekselstrømsnet svinger spændingen fra 0 til 400 volt 50 gange i sekundet. Man siger, at netfrekvensen er 50 Hz (Hertz).

Møllen producerer strøm

Vindens forsøg på at presse rotorens hastighed lidt længere op forårsager, at generatoren begynder at producere strøm ud til lednings.

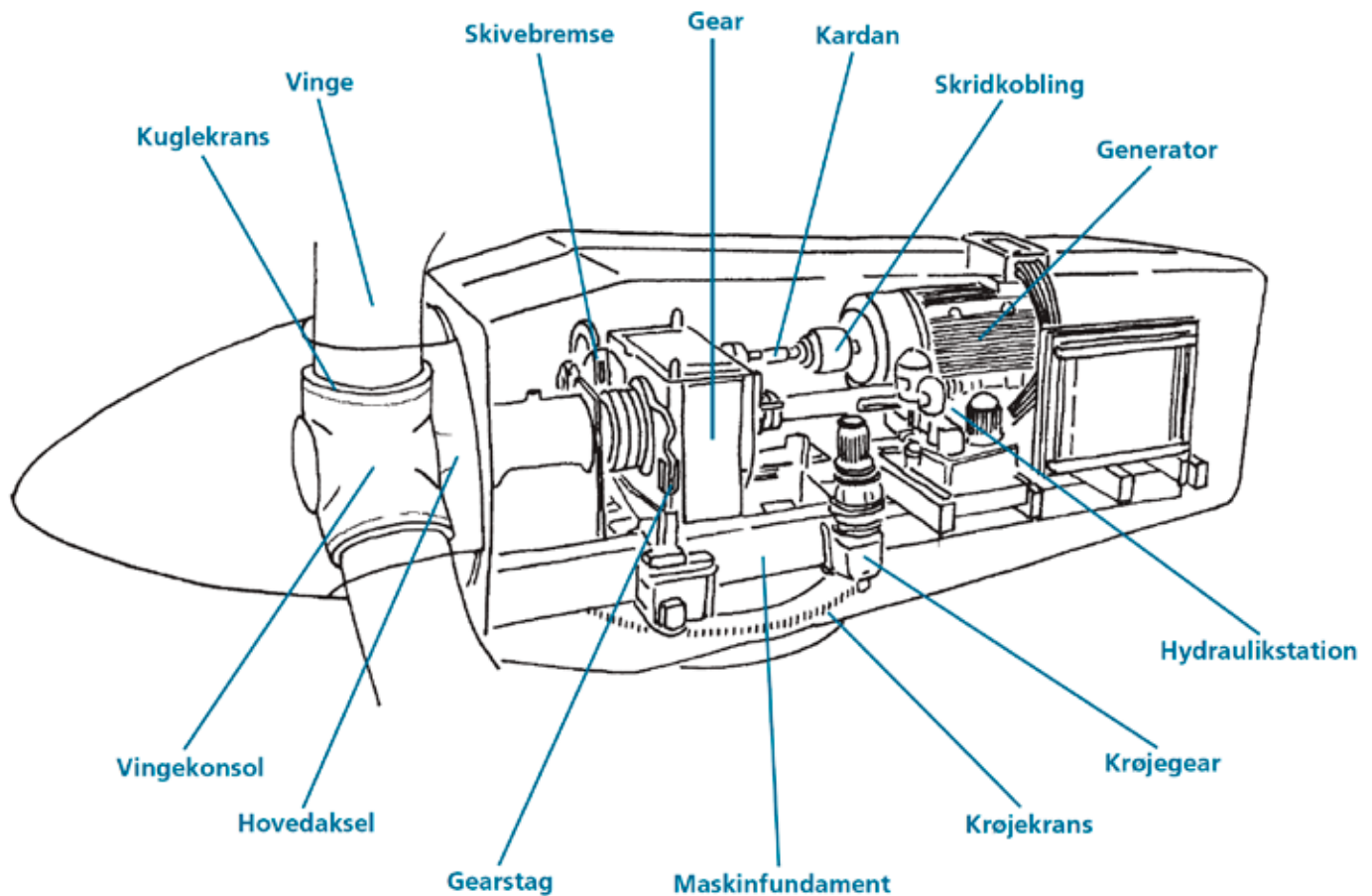
Møllen leverer stadig mere strøm i takt med øget vindhastighed (se møllens effektkurve ovenfor).

Når vindhastigheden har nået 12-14 m/s, yder møllen sit maksimum (dvs. 500 kilowatt for en 500 kilowatt mølle, 2 Megawatt for en 2 Megawatt mølle osv.). Møllen har nået det, man kalder »mærkeeffekten«. Det er den kapacitet, som møllens gear, aksler og generatorer er beregnet til at kunne holde til.

Stall regulering

Hvis vindhastigheden - og dermed energien i vinden - fortsat stiger, er møllen nødt til at »stalle«, for ikke at beskadige møllens maskineri.

Ved »stalling« bliver den aerodynamiske virkningsgrad pludselig ringere. Den hø-



sker, er generatorens hastighed faldet, og den begynder at virke som motor – det vil sige, den bruger strøm. Men møllens styring sørger for, at den ikke gør det ret længe. Møllegeneratoren kobles fra nettet, og rotoren kører langsomt rundt for til sidst at standse helt. Når vinden igen kommer, starter hele proceduren forfra med indkobling på nettet osv.

Møllen har to bremses

Vingebremser (aerodynamisk bremse) fungerer ved, at den yderste ende af møllens vinger eller hele vingen drejes 90 grader og dermed får rotorens omdrejninger til at falde. Vingebremser er møllens primære bremsesystem.

Den mekaniske bremse består af en bremseskive på akslen mellem møllens gear og generator. Bremseskiven påvirkes af et sæt bremseklodser – samme princip, som på en bil med skivebremses. Den mekaniske bremse er møllens sekundære bremse. På større møller er den mekaniske bremse kun en parkeringsbremse, der anvendes under service på møllen.

Møllens kontrolsystem

Vindmøllen er udstyret med et avanceret kontrolsystem, som består af en

computer, der løbende får meddelelse om møllens tilstand fra en række følere. Det er omdrejningstællere, effektmålere, vindhastigheds- og vindretningsmålinger, temperaturmålinger fra gear og generator m.m.

Møllens computer behandler løbende disse signaler og »beordrer« møllens systemer til at handle herefter. Det kan være krøjning, bremsning (hydraulikstation aktiveres), til- og frakobling fra elnettet m.m.

Derudover gemmer computeren »oplevelser« og ydelsestal som effekt, strøm, spænding osv. På møllens styring kan man således få udtrække data om møllens drift det sidste døgn, de sidste 30 dage, eller hvad man har programmeret den til.

Møllens styring er ofte forbundet via telefonnettet (modem) eller via internettet med fabrikanten eller servicefirmaets overvågningscomputer. Det betyder, at uanset hvor i verden en mølle står, kan fabrikanten se, om en mølle er gået i stå og hvorfor. Han kan evt. også se, hvad der skal afhjælpes, for at få den i drift igen. Ligeledes kan mølleejeren fra sin egen PC følge møllens drift.

Under danske vindforhold er en vindmølle i drift – dvs. at den producerer strøm – i mellem 6.000 og 7.000 timer

om året. Det betyder, at en mølle på et år har kørt flere timer, end de fleste biler har, den dag de skrottes. Det stiller meget store krav til konstruktionen og til den løbende vedligeholdelse.

Vindmøllers virkningsgrad

En vindmølle – konstrueret til danske vindforhold – vil udnytte ca. 25 procent af energindholdet i den vind, der passerer rotoren.

Tallet bliver til på følgende måde: Den teoretisk maksimale udnyttelse af vindenergiindholdet er 59 procent (ifgl. Betz' formel). De moderne møller udnytter i dag op til 45 procent på deres bedste driftspunkt. Det bedste driftspunkt er i konstruktionen lagt ved den vindhastighed, hvor der er mange timer og dermed den største andel af årets vindenergi. Det ligger under danske forhold på omkring 6-8 meter pr. sekund. Når møllen producerer ved højere eller lavere vindhastighed, falder virkningsgraden på grund af de aerodynamiske forhold. Det betyder, at den gennemsnitlige virkningsgrad over året vil ligge på 25-30 procent. Det er den del af energien, som omsættes i rotoren. Af denne energimængde tabes der 6-10 procent i gear og generator. Dermed når den samlede virkningsgrad ned på 22-28 procent.

En pitchreguleret mølle – dvs. en mølle, som er i stand til at regulere vingebladets indstilling – vil kunne reducere tabet med 5-7 procent og dermed opnå en højere totalvirkningsgrad. En mølle med en høj virkningsgrad vil normalt også være en økonomisk god mølle – afhængig af hvor meget, der er betalt ekstra for at opnå den høje virkningsgrad.

Det er dog vigtigt at bemærke, at »tabet« ved dårlig udnyttelse af vinden i en vis forstand ikke har kostet noget, idet vinden er gratis. Hvis derimod et brændselsstyret elproduktionsanlæg kører med 5 procent dårligere virkningsgrad, end det er optimalt muligt, så vil anlæget i hele sin levetid bruge 5 procent for meget brændsel og dermed også forurene 5 procent for meget ved fremstilling af en given elmængde.

Yderligere oplysninger

Vindmølleindustriens windpower-wikipedia

Kunstindustrimuseets ”Sådan fungerer en vindmølle”

Vattenfalls ”Sådan virker en moderne vindmølle”

Energitjenestens ”Hvordan virker en vindmølle”

DANMARKS
VINDMØLLEFORENING



Fakta om Vindenergi

Fakta om Vindenergi udgives af Danmarks Vindmølleforening.

Faktablade, der giver faktaoplysninger om en række udvalgte emner, kan rekvireres fra sekretariatet eller hentes på www.dkvind.dk.

Danmarks Vindmølleforening
Ellemarksvej 47, Bygning 6
8000 Århus C

Tlf. 8611 2600
(kl. 9-15, fredag 9-13)
Fax 8611 2700
E-mail: info@dkvind.dk
www.dkvind.dk

Faktablad T1, maj 2013