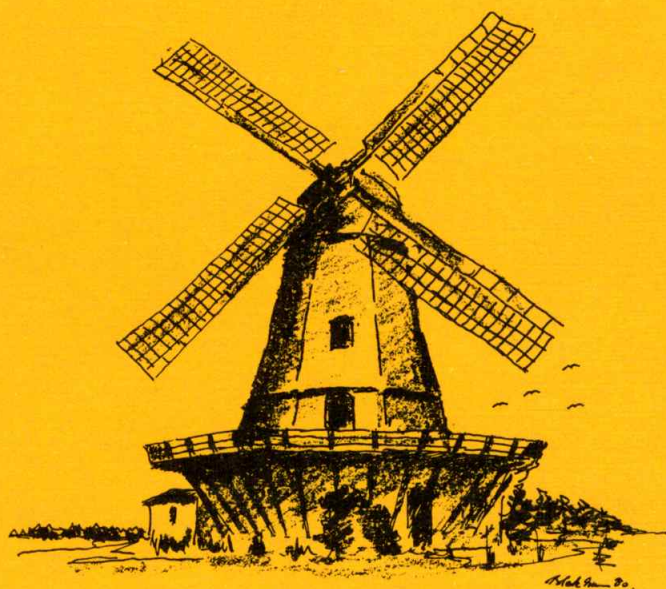


Finn Elvekjær

Henry Nielsen

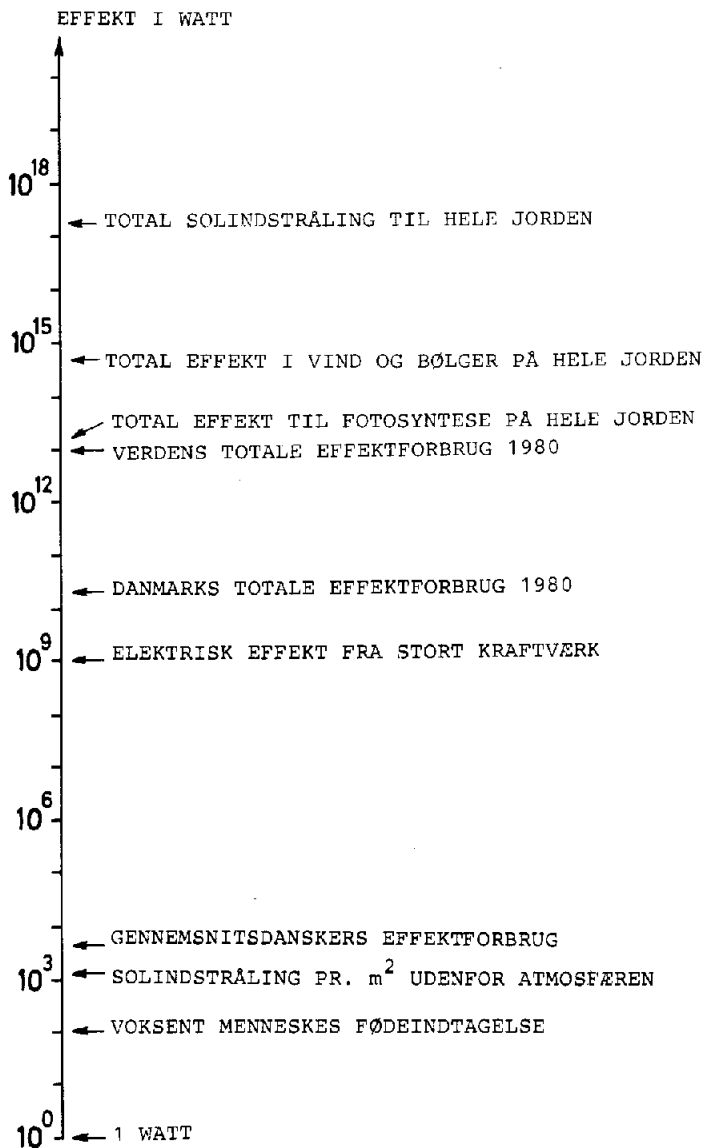
VINDENERGI og VINDMØLLER



FYSIK OG
ENERGI

F & K FORLAGET

VIGTIGE EFFEKT VÆRDIER



VINDENERGI og VINDMØLLER

**Finn Elvekjær
Henry Nielsen**

VINDENERGI OG VINDMØLLER

© Forfatterne samt F og K Forlaget.

Renskrivning af manuskript: Rie Vangkilde.

Trykt hos Budolfi Tryk i Aalborg, 1980.

ISBN 87-87229-00-5

Bøgerne kan rekvireres i pakker á 10 stk eller 25 stk ved skriftlig henvendelse til:

F og K Forlaget

LMFK-sekretariatet

Slotsgade 2³

2200 København N.

Indholdsfortegnelse

	side
FORORD	
1. VINDENERGI I PERSPEKTIV	1
1. Forskellige energikilder.....	1
2. Vindenergiens historie	5
3. Nyere vindmølleprojekter	9
4. Energilagring	14
2. VINDMØLLENS EFFEKTIVITET	17
1. Vindhastigheden før og efter møllen ..	17
2. Et vindrør	19
3. Beregning af en mølles maximaleffekt .	21
3. VINDMØLLENS FUNKTION	29
1. Vindmøllers opbygning	29
2. Mølleeffektivitet og hastighedsforhold	30
3. Modstandsmøller	34
4. Opdriftsprincippet. Bernoullis ligning	36
5. Opdriftsmøller	41
6. Energiomsætningssystemet	44
4. DANMARKS VINDRESSOURCER	46
1. Indledning	46
2. Vindens hastigheds- og effektfordeling	47
3. Vindens geografiske fordeling	51
4. Vindens variation gennem årets måneder	52
5. Størrelsen af vindeffekten og energi- behovet	54

5. ØKONOMI OG MILJØ	56
1. Pengeøkonomi	57
2. Energiøkonomi	61
3. Miljømæssige forhold	63
 STORE ØVELSER	 65
I. Vindmølle med vandbremse	66
II. Mølle med og uden lager	74
III. Forskellige Energiressourcer	80
 LITTERATURLISTE	 84

Forord

"Vindenergi og Vindmøller" er først og fremmest skrevet til valgfrit emne i fysik på gymnasiets matematisk-fysiske gren, men bogen vil formentlig også være anvendelig i andre sammenhænge.

Formålet med bogen er at give et overblik over de forskellige aspekter i forbindelse med den praktiske udnyttelse af vindenergien. Vi mener, det er vigtigt ikke alene at forstå fysikken bag udnyttelsen af vindenergi, men også at se og diskutere problemerne i den sammenhæng, hvori de forekommer i praksis. Der er derfor langt fra tale om nogen systematisk fysisk afhandling, og vi har prøvet at skrive de mere fysisk-matematiske afsnit af bogen så enkelt som muligt. Hovedvægten er i disse afsnit lagt på de fysiske principper, og vi har i så høj grad, vi har ment det forsvarligt, undladt alle komplicerende detaljer.

Bogen er delt i to hovedafsnit. Første del består af kapitlerne 1 til 5, der indeholder en introduktion til fysikken bag udnyttelsen af vindenergi og til de problemer, der knytter sig hertil. Denne del af bogen er skrevet, så den kan læses uden at man fordyber sig i de fysisk-matematiske afsnit. Anden del består af tre store øvelser. Vi har her lagt op til, at eleverne på realistiske eksempler selv kan undersøge forskellige sider af den praktiske udnyttelse af vindenergien i Danmark.

Det er klart, at det er umuligt at nå gennem hele bogen i løbet af et 10 eller 20 timers undervisningsforløb. Vi foreslår derfor, at man vælger enten at læse og gennemarbejde udvalgte dele af de fem kapitler, eller at man vælger at lægge hovedvægten på de store øvelser. Hvis man vælger at

FORORD

lægge hovedvægten på de tre store øvelser, foreslår vi, at undervisningsforløbet bliver delt op i to dele. I den første del gennemgår klassen sammen det grundlag, der er nødvendigt for at tage de store øvelser op. Man kan for eksempel vælge følgende afsnit:

kapitel 1: afsnit 1

kapitel 2: det hele

kapitel 3: afsnit 1 og 2

kapitel 4: afsnit 1, 2 og øvelse 4.1.

Med dette grundlag vil eleverne - for eksempel i grupper - være godt rustede til at tage de store øvelser op. Og den specielt interesserede elev vil på egen hånd kunne læse resten af bogen.

Vi har under udarbejdelsen af denne bog fået hjælp og vejledning af adskillige personer. Specielt vil vi rette en tak til følgende personer for deres mange konstruktive forslag til forbedringer: J.Chr.Bugge, S.Blegaa, O.Fabricius, G.Hermann, C.P.Knudsen, P.Madsen og B.Degn Nielsen. Vi takker også J.Chr.Bugge for tilladelse til at benytte mølleeffektivitetskurverne i figur 3.3 fra hans bog "Bogen om vindmøller" og K. Frydendahl for tilladelse til at benytte vejrkortet på figur 4.1 fra rapporten "Danmarks Klima, I Vind". Endelig takker vi M.Johansson og B.Maribo Pedersen for at have stillet diverse fotos til vores disposition.

Maj, 1980

Finn Elvekjær og Henry Nielsen

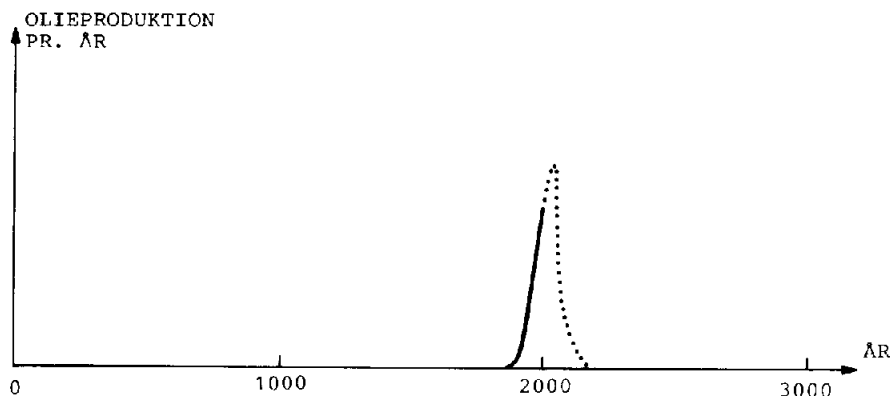
1. Vindenergi i perspektiv

1. Forskellige energikilder

I årtierne forud for oliekrisen i 1973, hvor de olieproducerende lande fik gennemtrumpfet en 3-4 dobling af prisen på råolie, blev en stedse stigende andel af verdens energiforbrug dækket af olieprodukter. Mens oliens andel kun udgjorde 9% i 1920, var dette tal i 1973 vokset til ca. 70%. For Danmarks vedkommende var det endda vokset til ca. 90%. Denne vækst i olieforbruget blev muliggjort af de meget store oliefund i Mellemøsten. De viste sig at være fantastisk billige både at udvinde og at transportere til forbrugerlandene. Hertil kommer naturligvis, at olie er langt mere bekvem at have med at gøre end f.eks. kul. Specielt i I-landene var man således blevet totalt afhængig af denne ene energikilde. Resultatet heraf var, at de olieproducerende lande var blevet en magtfaktor af stor betydning. Oven i købet var denne magt koncentreret på det geografisk set lille område i Mellemøsten.

Oliekrisen i 1973 var ikke udtryk for en egentlig oliemangel. Krisen var politisk bestemt og mandede, som allerede nævnt, ud i store prisforhøjelser på råolie. På længere sigt var krisen ikke desto mindre en tiltrængt advarsel om, at den sorgløst olieforbrugende æra hastigt nærmer sig sin afslutning. Alle førende olieeksperter er enige om, at olien ikke vil kunne dække den stadigt stigende efterspørgsel ret længe endnu. Olieproduktionen synes at skulle toppe omkring år 2000, og inden da må en væsentlig del af verdens energiforbrug være flyttet over på andre energikilder.

Når man desuden erindrer sig, at anvendelse af olie først begyndte for ca. 100 år siden, bliver det lysende klart, at den nuværende epoke i menneskehedens historie er noget helt specielt: I årtusinder har menneskene måttet eksistere uden olie som energikilde, nu forbruges hele oliekapitalen over en yderst kort periode af 1-200 års varighed, og derefter er man igen henvist til at klare sig uden olie i al fremtid. Dette ses illustreret på figur 1.1.



Figur 1.1 Det oliebaserede samfund vil kun være en kort episode i menneskehedens historie.

Hvilke energikilder kan da komme på tale som afløsere for olien?

Det er klart, at i den forestående vanskelige omstillingsperiode, vil man interessere sig for alle energikilder, hvad enten deres potentielle bidrag til energiforsyningen er stort eller lille. Set i det store perspektiv er der imidlertid kun fire kilder, der over en længere periode vil kunne tilfredsstille energibehovet i en verden med måske 10 milliarder mennesker, hvis disse skal have en blot acceptabel levestandard.

De fire energikilder er kul, fissionsenergi, fusionsenergi og solenergi. Energien fra de tre første energikilder kaldes lagerenergi. Lagerenergi er begrænset af mængden af bestemte stoffer på jorden. Den i praksis uudtømmelige solenergi kaldes vedvarende energi.

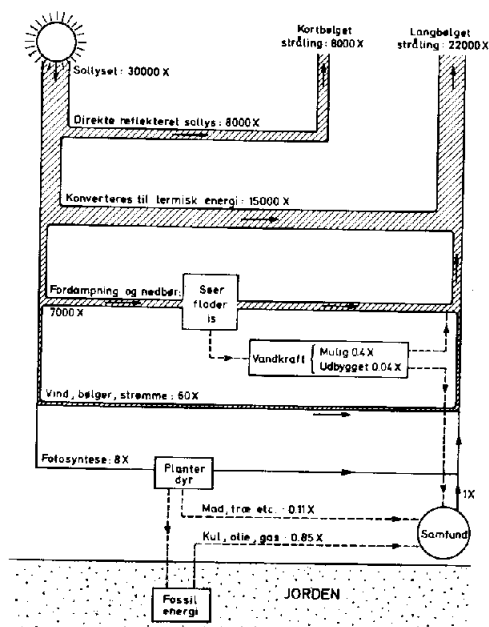
Kul er ligesom olie en form for fossil energi. Energilageret i kul er langt større end energilageret i olie. Man regner med, at der findes kul nok til flere hundrede års forbrug. Et mangedoblet forbrug af kul vil dog give anledning til store og måske uacceptable miljøproblemer.

Fissionsenergi frigøres ved spaltning af urankerner i to lette kerner. Uranressourcerne vil i praksis være uendeligt store, hvis de udnyttes i de såkaldte formeringsreaktorer. Disse reaktorer er under udvikling i en række lande, men det er på grund af problemer af miljømæssig og sikkerhedsmæssig karakter ikke klart, om de vil blive anvendt i stor målestok i fremtiden. I den nuværende generation af reaktorer - de såkaldt termiske reaktorer - udnyttes uranet så ineffektivt, at det anvendt heri kun repræsenterer en energimængde af nogenlunde samme størrelsesorden som olien. Udnyttelsen af fissionsenergi giver anledning til miljøproblemer af en helt anden natur end dem, der knytter sig til brugen af kul.

Fusionsenergi frigøres ved sammensmeltning af lette atomkerner til tungere atomkerner (f.eks. deuterium til helium). Det er ved denne metode, solen har opretholdt sin enorme energiproduktion gennem milliarder af år. Endnu har vi ikke lært at tæmme fusionsenergien, men der forskes i disse år intensivt for at løse de problemer, der stadig stiller sig i vejen. Såfremt det lykkes, vil der være åbnet for adgangen til en udtømmelig energikilde, der tilmed synes at være betydelig mere miljøvenlig end kullene og fissionsenergien.

Solenergi. Fra solen kommer en jævn strøm af energi til jorden. Denne energistrøm holder jordens temperatur langt over det absolutte nulpunkt, den driver strømmene i atmosfæren (vindene) og i havet, og den er årsag til vandets kredsløb og til fotosyntesen i levende planter. I figur 1.2 sammenlignes energistrømmene til og fra jorden og dens atmosfære med den energi, der omsættes i samfundet. Tallene på figuren angiver energistrømmenes størrelse i forhold til verdens (samfundets) totale energiforbrug på nuværende tidspunkt. Vi ser f.eks., at den vedvarende energistrøm i vind

VINDENERGI I PERSPEKTIV



Figur 1.2 Det soldrevne kredsløb. Energistrømmene til og fra jorden vises ved hjælp af bånd og linier, hvis bredde giver et indtryk af størrelsen af energiindholdet i de forskellige energistrømme. Størrelsen af en bestemt energistrøm er angivet i forhold til samfundets totale effektforbrug, der på figuren er angivet med X (udtrykt i Watt er $X = 8 \times 10^{12} \text{ W} = 8 \text{ TW}$). For eksempel ser vi, at vind og bølger indeholder cirka 60 gange så meget energi, som samfundet i øjeblikket forbruger. Den indkommende solenergi deles op i en række energistrømme, hvoraf den første er "Direkte reflekteret sollys", den næste er sollys, der "Konverteres til termisk energi" og så videre. Den mindste del går til "Fotosyntese". En del af den energi, der gennem fotosyntesen oplagres i planterne, bliver til sidst udnyttet og oplagret i dyrene. "Fossil energi" rummer energien fra døde dyr og planter, der er begravet i jorden for millioner af år siden. Kul, olie og naturgas er eksempler på fossile energikilder, der altså i virkeligheden indeholder oplagret solenergi.

og bølger er ca. 60 gange så stor som den energi, der på nuværende tidspunkt omsættes i samfundet. Der er altså betydelige energimængder til rådighed i vind og bølger, og det er klart, at det er af stor betydning for os at finde ud af, i hvor høj grad det vil være muligt at udnytte disse energikilder.

Øvelse 1.1

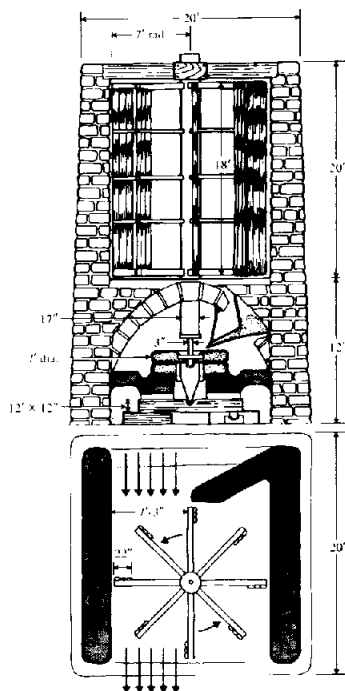
- a) Giv en kort beskrivelse af nogle af de miljøproblemer, som er forbundet med udnyttelsen af ovennævnte energikilder.
- b) I øjeblikket spiller de vedvarende energistrømme kun en ringe rolle i verdens energiforsyning. Hvilke er de største problemer, der er forbundet med en storstilet udnyttelse af de vedvarende energistrømme?

2. Vindenergiens historie

Siden oldtiden har man udnyttet vindens evne til at udføre et arbejde. Det vides med sikkerhed, at perserne så tidligt som 200 år før vor tidsregning byggede vindmøller, nogle af dem endda så solide, at de findes den dag i dag. På figur 1.3 vises en skitse af en sådan persisk vindmølle. Denne mølle har lodret aksel, og den blev anvendt til maling af korn. Vinden opfanges af sejl, der er udspændt mellem de egre, der udgår fra top og bund af den lodrette aksel.

Op gennem oldtid og middelalder spredtes brugen af vindmøller til Europa, hvor den vandretakslede type oplevede en kulmination i det 17. århundrede i Holland. Det er nok

VINDENERGI I PERSPEKTIV



Figur 1.3 Persisk vindmølle til maling af korn. (Længdemålene er 1 fod = 30.48 cm og 1 tomme = 2,54 cm).

ikke for meget sagt, at Holland dengang blev verdens førende nation gennem udstrakt anvendelse af vindkraft i såvel skibe som vindmøller.

Med den kulfyrede dampmaskines opfindelse kom vindmøllen ud for særdeles alvorlig konkurrence. I første omgang erobrede dampmaskinen en dominerende stilling inden for byerhvervenes energiforsyning. Den gav både billigere og betydeligt mere pålidelig energi end vindmøllen. Herved blev vindmøllen henvist til mere specielle opgaver, som f.eks. at forsyne gårde og huse på landet med energi. Da elektriciteten vandt frem i første halvdel af dette århundrede blev vindmøllerne fortrængt også fra disse opgaver.



Figur 1.4 Fotografi af Hollandsk vindmølle ved Skelskør. Billedet er fra 1974 (Nordisk Pressefoto).

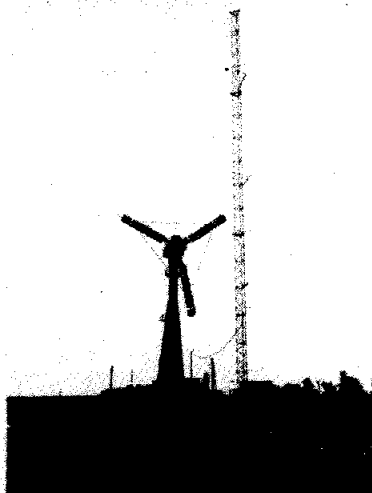
Det er ganske interessant, at selv om det var elektriciteten, der endte med at slå vindmøllerne ud, blev der gjort mange forsøg på at få disse to energiformer til at gå i spand sammen. Danskeren Poul la Cour, der var forstander på Askov Højskole, var én af pionererne på dette område. Han påbegyndte allerede i 1892 studier af vindmøllers energiproduktion som funktion af vingernes form og rotationshastighed. På grundlag af de indhøstede erfaringer blev der i 1902 opført en 4-bladet mølle med en vingeradius på 9 meter. Rotorerne var koblet til 2 elgeneratorer, der hver var på 9 kW. Dette vindkraftanlæg bidrog til elforsyningen af Askov by helt til 1962.

Også i andre lande blev der gjort forsøg med at få vindmøller til at levere elektricitet til det offentlige elektricitetsnet. Der blev lavet forsøg med ret store vindmøller med aerodynamisk udformede vingeprofiler i Tyskland, Frankrig, USA og Sovjetunionen. Mest kendt fra denne periode er uden tvivl Smith-Putnam's store 2-bladede vindmølle, der blev opført i 1940/41 ved Grandpa's Knob i staten Vermont, USA. Mølletårnet var 35 meter højt, vingeradius 26 meter og hver vinge vejede 8 tons og var lavet af rustfrit stål. Bladvinklen kunne reguleres, således at rotorerne fik en konstant omdrejningsfrekvens på ca. 29 omdrejninger pr. minut. Rotoren var forbundet med en 1250 kW jævnstrømsgenerator. Desværre fungerede denne mølle kun i nogle få måneder, fordi den ene vinge brækkede af. Som følge af verdenskrigen blev den aldrig sat i drift igen.

Det sidste "historiske" eksempel vi vil omtale, er den 3-bladede Gedsermølle, der blev bygget af danske elværker under ledelse af ingeniør J. Juul. Gedsermøllen (figur 1.5) blev opført i 1958. Den havde en vingeradius på 12 meter og en generator på 200 kW. Den fungerede stort set upåklageligt i årene indtil 1967, hvor den blev taget ud af drift på grund af for store driftsomkostninger. I 1978-79 blev den sat i drift igen, efter at der var foretaget forskellige nødvendige reparationer. Dette skete som et vigtigt led i Handelsministeriets og elværkernes nye vindkraftprogram (se side 12). Formålet var først og fremmest at skaffe nøjagtige oplysninger om den mere end 20 år gamle mølles effektivitet og driftsforhold i det hele taget.

Vi kan altså konstatere, at der i årene før energikrisen i 1973, er blevet bygget og afprøvet en række store vindmøller rundt om i verden, selv om der langt fra har været tale om en systematisk indsats. De er dog alle blevet standset igen efter kortere eller længere tids forløb. Den væsentligste grund hertil var, at de totale udgifter pr. produceret kWh viste sig at være for høje sammenlignet med de tilsvarende omkostninger ved at fremstille elektricitet

Figur 1.5 Gedsermøllen efter istandsættelsen i 1978. Stålmasten i forgrunden er forsynet med forskelligt meteorologisk måleudstyr, bl.a. vindhastighedsmålere.



ud fra fossile energikilder som olie og kul. Hertil kommer, at vindmøller kun producerer store energimængder i vindrige perioder. Det betyder, at man ikke kan basere energiforsyningen på vindmøller alene. Enten må vindmøllerne være koblet til en eller anden form for energilager, eller der må være adgang til en anden energikilde i vindfattige perioder. Herved øges systemets totale omkostninger naturligvis væsentligt.

3. Nyere vindmølleprojekter

Som nævnt resulterede oliekrisen i 1973 i store prisstigninger på olien, og hidtil forkastede energikilder kom atter i søgelyset. I hvert fald i alle industrilande blev de statslige bevillinger til forskning og udvikling af alternative energikilder - herunder vedvarende energikilder -

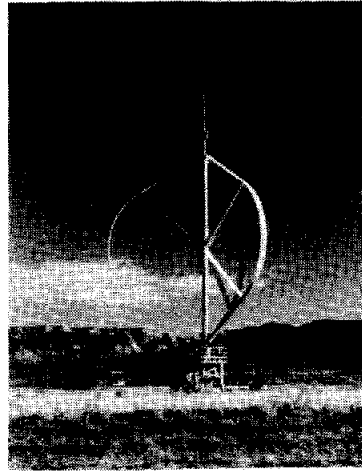
således kraftigt forøget. Tager vi USA som eksempel, var situationen den, at mens beløbet til forskning og udvikling af solenergi i alle dens former var næsten lig med nul i 1973, var det i 1980 kommet op på ikke mindre end ca. 1000 millioner \$. Deraf var omkring 60 millioner \$ afsat til vindenergi. Med disse mange penge til rådighed er det naturligt, at det amerikanske vindkraftprogram er blevet meget vidtspændende. En mængde større og mindre møller gennemprøves for at finde de typer, man i længden vil satse på. For de store vandretakslede møllers vedkommende har man hidtil lagt hovedvægten på en udgave med to-bladet rotor. Et eksempel herpå er den såkaldte Model 0, der er afbildet på figur 1.6. Denne mølle har vingerne i tårnets læside. Det betyder, at vinden skal passere gennem tårnkonstruktionen før den rammer møllebladene, og det har vist sig at give anledning til betydeligt større kraftpåvirkninger på vingerne, end man havde forudset. Det er derfor bestemt, at den senere Model 2 i lighed med f.eks. Gedsermøllen skal have vingerne i tårnets vindside. Den første Model 2 mølle forventes at stå færdig i 1980. Den får en vingeradius på 45 meter og en generator på 2500 kW.

Forskningen omkring den lodretakslede Darrieus-mølle er i U.S.A. koncentreret ved Sandia Laboratorierne i



Figur 1.6 Amerikansk for-søgs-mølle (Model 0) ved Plum Brook i staten Ohio.

Figur 1.7 Sandia Laboratori-
ernes 60 kW Darrieus mølle.



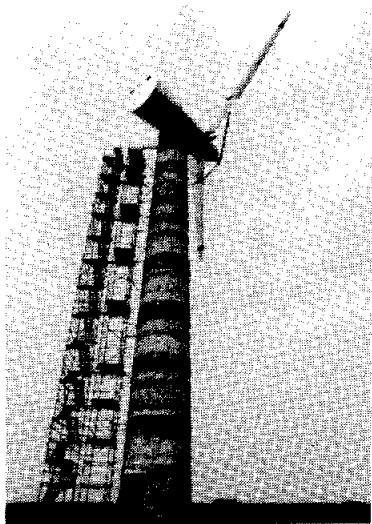
New Mexico. Her blev der i 1977 opstillet et Darrieus-anlæg med rotordiameter på 17 meter og en installeret effekt på 60 kW (se figur 1.7).

Darrieus-møllen er først og fremmest interessant, fordi den formodentlig vil kunne gøres særlig billig ved serieproduktion. Det skyldes, at konstruktionen kan gøres lettere end ved de vandretakslede møller, idet rotor, gear og generator kan anbringes ved jorden. I øvrigt er det først og fremmest i Canada, der satses på netop Darrieusmølleprincippet.

Blandt danske projekter er der grund til at nævne den meget omtalte Tvind mølle, der er blevet til på initiativ af lærere og elever på Tvindskolerne i Ulfborg ved Herning. Efter 3 års imponerende arbejdsindsats stod møllen færdig i januar 1978, hvorefter de omfattende prøvekørsler kunne påbegyndes. Disse er endnu ikke afsluttede, og det er derfor indtil videre uklart, om denne mølle kan leve op til de store forventninger, der har været stillet til den. Tvindmøllen er med sin vingeradius på 27 meter og sin generator-effekt på 2000 kW én af verdens største vindmøller.

I øvrigt har den danske stat afsat ca. 50 millioner kroner til gennemførelse af et femårigt vindkraftprogram. Hovedbestanddelen i dette program er opførelsen af to store nettilsluttede vindmøller (mølle A og mølle B) ved Nibe Bredning i løbet af 1978/79, samt forsøgsdrift med disse over en årrække. Møllerne, hvoraf den ene er vist på figur 1.8, er kun forskellige ved vingernes udforming og ved den bladregulering der anvendes. Mølle A's vingeblade udgør et stift system ligesom ved Gedsermøllen, medens mølle B har fritbærende blade. Tårnene er lavet af beton og vingerne af glasfiber og stålrør. Vingerne er anbragt foran tårnet (altså i vindsiden), så bladene ikke skal passere gennem tårnets "kølvand" og derved udsættes for kraftige stødpåvirkninger.

Mange har undret sig over, at de ansvarlige personer har valgt at opføre to næsten ens møller så tæt ved hinanden (afstanden mellem dem er kun 220 meter), men forklaringen er i og for sig ganske simpel: Man får herved en enestående chance for at foretage en virkelig realistisk sammenligning af energiproduktion og driftsforhold i bredeste forstand



Figur 1.8 Fotografi af mølle A under påmontering af vingerne i august 1979 (Nordisk Pressefoto)

	Model A	Model B
Rotorradius (m)	20	20
Tårnhøjde (m)	41	41
Antal blade	3	3
Startvindhastighed (m/s)	5	5
Stopvindhastighed (m/s)	25	25
Vægt af 1 blad (tons)	3,4	3,4
Omdrejningsfrekvens (omdr/min)	34	34
Generatortype	4 polet asynkron	4 polet asynkron
Generatoreffekt (kW)	630	630
Generatorens vægt (tons)	4	4
Anslået årlig elproduktion (kWh)	1.5×10^6	1.5×10^6

Tabel 1.1 Tekniske data for mølle A og mølle B
(Maribo Pedersen, 1979)

mellem en simpel og robust møllekonstruktion (mølle A) og en mere raffineret type (mølle B).

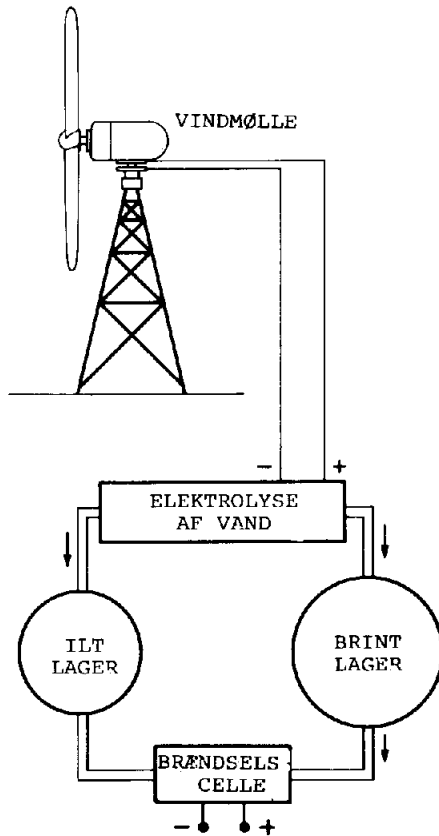
Såfremt de indhøstede erfaringer fra Nibe-møllerne og fra senere forsøgsmøller er tilfredsstillende, vil man formodentlig i sidste halvdel af 80'erne foretage en egentlig udbygning med vindkraftanlæg til dækning af f.eks. 10% af Danmarks elforbrug (Maribo Pedersen, 1979). Forudsætningen for at øge denne procentdel væsentligt er, at man har store og billige lagringssystemer til rådighed, hvori man kan gemme energien fra vindrige perioder til perioder med vindstille.

4. Energilagring

Egnede energilagre findes i dag kun i lande, hvor en betydelig del af elproduktionen foregår på basis af vandkraft. Er dette tilfældet, kan man holde noget af flodvandet tilbage, når vindmøllerne producerer strøm, og igen åbne for flodvandet, når møllerne står stille. Herved lagrer man energi i form af potentiel energi i det tilbageholdte flodvand, og dette er en både billig og meget effektiv form for energilagring. I princippet har Danmark også denne mulighed til rådighed, da det danske elnet er forbundet med elnettet i Norge og Sverige, hvor vandkraft spiller en stor rolle. Man må dog nok regne med, at det på lidt længere sigt vil være ret beskedent, hvor stor lagerkapacitet Danmark kan disponere over på denne måde. Norge og Sverige planlægger begge en betydelig udbygning med vindkraftanlæg og andre vedvarende energianlæg, og de må derfor formodes selv at få brug for næsten al deres vandkraftkapacitet indenfor en overskuelig fremtid. En større forøgelse af denne vandkraftkapacitet er ret vanskelig at forestille sig, da det vil medføre betydelige miljødelæggelser, som store dele af befolkningen vender sig imod. Det skal dog anføres, at ikke alle er enige i ovenstående betragtninger (Sørensen, 1980).

De blybatterier, vi alle kender som startbatterier til biler, er desværre alt for tunge og alt for dyre per lagret energienhed, til at de kan komme på tale som energilagre i stor stil. Mere avancerede batterier (Jensen, 1980) er under udvikling og vil måske kunne komme til at spille en vis rolle som korttidslagre til udjævning af den stærkt varierende elproduktion fra vindkraftværker.

En meget interessant form for energilager - som måske en dag kan tages i brug i stor målestok - er brintlageret, der er illustreret på figur 1.9. I de perioder, hvor der ikke er behov for den elektricitet, som vindmøllen producerer, ledes strømmen gennem et elektrolysekar. Herved bliver der dannet ilt og brint, der oplagres i hver sin beholder. Når der senere bliver behov for elektrisk strøm, ledes de to luftarter til hver sin pol i en brændselscelle. Brændsels-



Figur 1.9 Fremtidsperspektiv. Skitse af vindmølle koblet til brintenergilager og brændselscelle.

cellen er et apparat, hvor ilten igen kan forene sig med brinten under dannelse af vand; samtidig opstår der en spænding mellem de to poler i cellen, og forbindes disse derfor med en ydre ledning vil der gå en jævnstrøm herigennem, en jævnstrøm der naturligvis kan omdannes til vekselstrøm og derpå fødes ind på elnettet.

Denne skitse af et energisystem baseret på vedvarende energi - f.eks. vindenergi - i forbindelse med et brintlagringssystem, virker uhyre tiltalende udfra et energi- og miljøsynspunkt, da der ikke dannes andre "forbrændingsprodukter" end vand. Problemerne er først og fremmest knyttet til lagringen af brinten (som luftart fylder den meget og som vædske kræver den nedkøling til ca. 20 K); men de nuværende brændselsceller er heller ikke tilstrækkeligt udviklede, de er dels for dyre, og dels når deres effektivitet ikke over ca. 50%. Med andre ord vil kun ca. halvdelen af den strøm, som vindmøllen producerer, blive nyttiggjort, såfremt man indskyder et elektrolyse-brændselscelle lagringssystem.

Denne form for energilagring ligger i bedste fald et godt stykke ude i fremtiden.

Andre energilagringssystemer, der også arbejdes en hel del med, er roterende svinghjul, trykluftanlæg og supraledeende spoler. Men af pladsmæssige grunde vil de ikke blive omtalt her.

2. Vindmøllens effektivitet

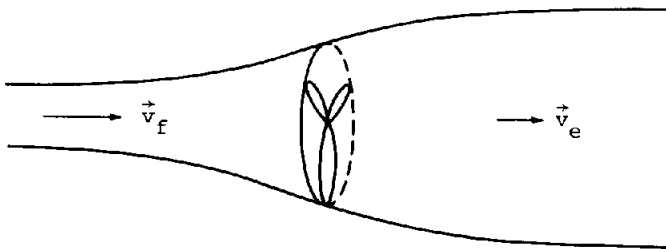
1. Vindhastigheden før og efter møllen

I dette afsnit vil vi undersøge, hvor effektivt en vindmølle kan opfange vindens energi.

Lige før vinden rammer møllen, vil den have en vis energi, der er givet ved vindhastigheden v og luftens massetæthed ρ . Lad os se på én volumenenhed af luften (dvs. 1 m^3 , hvis vi regner i SI-enheder). Den vil have den kinetiske energi $\frac{1}{2}\rho v^2$. Forestiller man sig, at møllen opfanger hele vindens energi, kan det kun ske ved, at den bremser vinden fuldstændigt op. Dette viser sig at være umuligt, og vi vil i det følgende undersøge, hvor stor en del af vindens energi, møllen maksimalt kan opfange.

Grunden til at møllen ikke kan opfange hele energien er, at vinden nødvendigvis må fortsætte også bag ved møllen. Luften kan ikke bare standse op ved møllen og blive liggende dér.

På figur 2.1 har vi skitseret, hvorledes vinden strømmer forbi møllen.



Figur 2.1

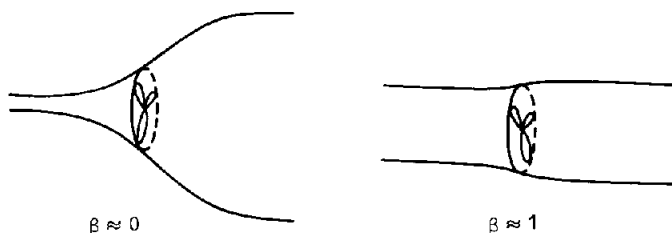
Foran møllen har vinden hastigheden $\vec{v}_f$, og efter møllen har vinden hastigheden $\vec{v}_e$. Der gælder naturligvis, at $v_e < v_f$.

Møllen opfanger energi fra et vist vindrør foran møllen. Da hastigheden bliver mindre ved passage af møllen, fylder luften mere bag ved end foran møllen. Det vindrør, hvori vinden fortsætter bag møllen, er derfor bredere end vindrøret foran møllen.

For at få et mål for hvor meget af vindens energi, møllen opfanger, indfører vi størrelsen β , der angiver forholdet mellem hastighederne v_e og v_f :

$$\beta = \frac{v_e}{v_f}$$

Det er klart, at parameteren β ligger i intervallet $0 \leq \beta \leq 1$. På figur 2.2 er vist strømforholdene i de to tilfælde $\beta \approx 0$ og $\beta \approx 1$.



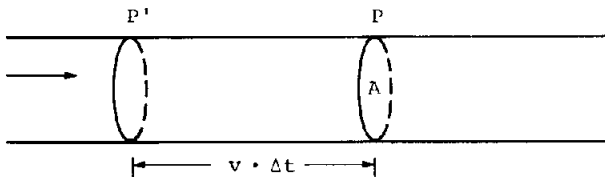
Figur 2.2

Ved første øjekast ser det ud til at være fordelagtigt, hvis $\beta \approx 0$, idet vinden så næsten vil blive bremsat op. Til gengæld vil møllen kun opfange energi fra et meget smalt vindrør foran møllen, da der er grænser for, hvor meget vindrøret kan brede sig bag ved møllen. I det andet ekstreme tilfælde, hvor $\beta \approx 1$, er det klart, at møllen ikke opfanger ret megen energi. Luften forstyrres jo næsten ikke ved passagen gennem møllen.

For at finde ud af nøjagtigt hvilket β , der er det mest fordelagtige, vil vi i næste afsnit udtrykke præcist, hvad det betyder, at vinden fortsætter bag ved møllen. Vi vil desuden benytte, at både impulsen og energien er bevaret i et isoleret system. Det følger så, at den mest fordelagtige værdi for β er $\beta = 1/3$. Den mest effektive mølle reducerer altså vindhastigheden til $1/3$ af hastigheden foran møllen.

2. Et vindrør

Se på et vindrør, der er lagt, så vindens hastighed er parallel med røret. Vindrørets tværsnitsareal er A .



Figur 2.3

Lad os beregne den vindmængde, der passerer et tværnit af røret ved punktet P i løbet af tidsrummet Δt .

Ser vi på en bestemt luftdel vil den i løbet af tidsrummet Δt bevæge sig stykket $v \cdot \Delta t$. Det betyder, at luften i det viste stykke af røret fra P' til P vil passere P i det givne tidsrum.

Volumenet V af røret P' til P er $V = A \cdot v \cdot \Delta t$. Massen Δm af den luftmængde, der passerer P i løbet af tiden Δt , er så givet ved (ρ er massetætheden af luften)

VINDMØLLENS EFFEKTIVITET

$$\Delta m = \rho \cdot v \cdot \Delta t \cdot A$$

Massen af den luftmængde, der passerer per tidsenhed er derfor givet ved

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot v \cdot A \quad (2.1)$$

Impulsen af luftmængden, der passerer punktet P per tidsenhed, bliver så

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v \quad (2.2)$$

Tilsvarende er den kinetiske energi af denne luftmængde givet ved

$$\frac{\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v^2 \quad (2.3)$$

Dette udtryk for energistrømmen gennem vindrøret kalder vi for vindens effekt P_0 i vindrøret:

$$P_0 = \frac{\Delta E_k}{\Delta t}$$

Indsætter vi formel (2.1) i (2.3) får vi følgende meget vigtige udtryk for P_0 .

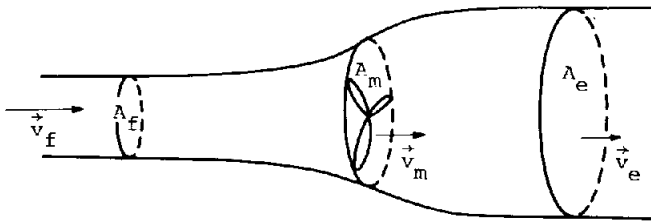
Vindens effekt:

$$P_0 = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3\right) \cdot A \quad (2.4)$$

Der gælder således, at den vindenergi, der per tidsenhed passerer 1 m^2 vinkelret på vindretningen, er proportional med vindhastigheden i 3. potens. Forøges vindhastigheden til det dobbelte, bliver vindens effekt altså ikke mindre end 8 gange større.

3. Beregning af en mølles maximale effektivitetMølleeffektiviteten

Se igen på vindrøret omkring en mølle. Røret har tværsnitsarealet A_f , A_m og A_e henholdsvis foran møllen, ved møllen og bagved møllen. Tilsvarende betegner vi hastighederne de tre steder med $\vec{v}_f$, $\vec{v}_m$ og $\vec{v}_e$.

Figur 2.4

Den energi, møllen modtager fra vinden, er ifølge energisætningen lig med det arbejde, som vindkraften udfører på møllen. Den energi, møllen per tidsenhed modtager fra vinden, er derfor lig med vindkraftens effekt P_m på møllen (effekt = arbejde per tidsenhed).

Det viser sig at være lettere at beregne møllens effekt på vinden - altså det arbejde, møllen per tidsenhed udfører på vinden. Møllens effekt på vinden må være lig med $-P_m$, eftersom vi går ud fra, at den samlede energi af vinden og møllen er bevaret. Kalder vi den resulterende vindkraft på møllen for $\vec{F}_m$, er dette en vektor, der går i samme retning som den frie vindhastighed. Ifølge Newton's 3. lov påvirker møllen derfor vinden med den resulterende kraft $-\vec{F}_m$. Vi får derfor, at

$$-P_m = -\vec{F}_m \cdot \vec{v}_m$$

hvilket giver

$$P_m = F_m \cdot v_m \quad (2.5)$$

For at få et mål for hvor effektivt møllen opfanger vind-energien, må vindens effekt måles i forhold til den vindenergi, der er til rådighed.

Til sammenligning ser vi derfor på den energi, der per tidsenhed passerer på møllevingernes plads, når møllen ikke er der. Vi ser altså på vindens effekt P_o i et vindrør med tværsnitsareal A_m . Hvis møllen ikke er der, vil vindens hastighed være konstant lig med v_f . Det følger derfor af formel (2.4), at P_o er givet ved

$$P_o = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^3\right) \cdot A_m \quad (2.6)$$

Vi kan nu definere mølleeffektiviteten C_p ved ligningen:

$$C_p = \frac{P_m}{P_o} \quad (2.7)$$

Den er et mål for vindens faktiske effekt set i forhold til P_o . Det er klart, at $0 \leq C_p \leq 1$.

Indsætter vi formlerne (2.5) og (2.6) i definitionen af C_p , får vi

$$\text{Mølleeffektiviteten:} \quad C_p = \frac{F_m \cdot v_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^3 \cdot A_m} \quad (2.8)$$

I de følgende afsnit vil vi reducere dette komplicerede udtryk for mølleeffektiviteten. Det viser sig, at C_p kan skrives som en funktion af parameteren $\beta = v_e/v_f$. Vi vil basere regningerne på tre bevarelsessætninger, der gælder for et isoleret system: massebevarelse, impulsbevarelse og energi-bevarelse.

Massebevarelse

Lad os først se på massebevarelsen. Den udtrykker, hvad vi hidtil løst har omtalt ved at sige, at den luftmasse, der rammer møllen, også må forsætte bag ved møllen.

Ifølge ligning (2.1) vil massen af den luftmængde, der per tidsenhed passerer vindrøret foran møllen, være givet ved

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot v_f \cdot A_f$$

Den samme luftmængde fortsætter gennem røret til møllen og videre bagved møllen. Man siger, at massen er bevaret. Ved hjælp af formel (2.1) kan dette udtrykkes på følgende måde:

$$\boxed{\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot v_f \cdot A_f = \rho \cdot v_m \cdot A_m = \rho \cdot v_e \cdot A_e} \quad (2.9)$$

Vi har her antaget, at luftens massetæthed er den samme overalt i vindrøret. Det er ikke umiddelbart indlysende, at dette er en rimelig antagelse. Det viser sig imidlertid, at vi ved at gøre denne antagelse kun begår en meget lille fejl^(*).

Impulsbevarelse

Impulsen af den luftmængde, der per tidsenhed passerer gennem vindrøret foran møllen, er ifølge formel (2.2) givet ved

$$\frac{\Delta p_f}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v_f$$

Impulsen af den luftmængde, der per tidsenhed passerer bagved

^(*) Uden bevis nævner vi her, at det er en rimelig antagelse, fordi vindhastigheden er meget mindre end lydets hastighed i luft.

er på tilsvarende måde givet ved

$$\frac{\Delta p_e}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v_e$$

Vi ved, at impulsen af et lukket system (i dette tilfælde luften og møllen) er bevaret. Det betyder, at møllen per tidsenhed modtager den impuls, som vinden afgiver per tidsenhed. Betegner vi møllens impuls med p_m , følger det altså, at

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_m}{\Delta t} &= \frac{\Delta p_f}{\Delta t} - \frac{\Delta p_e}{\Delta t} \\ &= \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f - v_e) \end{aligned}$$

Ifølgel Newton's 2. lov er ændringen af møllens impuls per tidsenhed lig med kraften på møllen. Vindens kraft F_m på møllen er altså givet ved udtrykket

$$F_m = \frac{\Delta p_m}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f - v_e) \quad (2.10)$$

Energibevarelse

Vindkraftens effekt P_m på møllen angiver, hvor meget møllens energi E_m ændres per tidsenhed:

$$P_m = \frac{\Delta E_m}{\Delta t}$$

Den energi, der per tidsenhed passerer vindrøret henholdsvis foran møllen og bagved møllen, er ifølge formel (2.3)^(*)

(*) **Fodnote: Se næste side!**

givet ved

$$\frac{\Delta E_f}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v_f^2 \quad (2.11a)$$

$$\frac{\Delta E_e}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v_e^2 \quad (2.11b)$$

Da energien er en bevaret størrelse, har møllen modtaget netop den energi, som vinden har tabt ved passagen af møllen gennem vindrøret:

$$\frac{\Delta E_m}{\Delta t} = \frac{\Delta E_f}{\Delta t} - \frac{\Delta E_e}{\Delta t}$$

Vindkraftens effekt på møllen kan ved hjælp af disse form-
ler udtrykkes på følgende måde

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f^2 - v_e^2) \quad (2.12)$$

(*) På dette sted forenkler vi situationen en hel del. Ligning (2.11a) er korrekt. Men udtrykket på højre side af (2.11b) repræsenterer ikke al den energi, der findes i luften bag møllen. Når vinden passerer de roterende møllevinger, vil den udover at blive bremsed op også blive bragt i rotation (i modsat retning af møllevingerne). Og som følge af gnidning mellem luftmolekyler og møllevinger og luftmolekylerne indbyrdes, vil der tillige blive udviklet en vis mængde termisk energi. I virkeligheden burde der altså på højre side af (2.11b) være to ekstra led, der repræsenterer henholdsvis rotationsenergi og termisk energi. Det er imidlertid meget kompliceret at tage disse led med i praksis, og fejlen vi begår er ikke afgørende for resultatet af vores beregninger.

VINDMØLLENS EFFEKTIVITET

Inden vi går over til at beregne den maksimale mølleeffektivitet, bruger vi de fundne ligninger til at finde vindens hastighed v_m ved møllen.

Vindhastigheden v_m

Af formel (2.5) og (2.12) får vi

$$F_m \cdot v_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f^2 - v_e^2)$$

Vi indsætter heri udtrykket (2.10) for F_m :

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f - v_e) \cdot v_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f^2 - v_e^2)$$

Dette medfører, at

$$\boxed{v_m = \frac{1}{2} \cdot (v_f + v_e)} \quad (2.13)$$

Vindhastigheden ved møllen er altså lig med middelværdien af vindhastighederne foran møllen og bagved møllen.

Den maksimale mølleeffekt

Indsætter vi formel (2.10) for F_m i udtrykket (2.8) for mølleeffektiviteten C_p får vi

$$C_p = \frac{\frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot (v_f - v_e) \cdot v_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^3 \cdot A_m}$$

Ifølge formel (2.9) er $\Delta m / \Delta t = \rho \cdot v_m \cdot A_m$. Det følger herefter,

at

$$C_P = \frac{\rho \cdot v_m \cdot A_m \cdot (v_f - v_e) \cdot v_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^3 \cdot A_m}$$

$$= \frac{(v_f - v_e) \cdot v_m^2}{\frac{1}{2} \cdot v_f^3}$$

Indsætter vi heri udtrykket (2.13) for v_m , får vi

$$C_P = \frac{1}{2} \frac{(v_f - v_e) \cdot (v_f + v_e)^2}{v_f^3}$$

og dette udtryk kan omskrives til

$$\boxed{C_P = \frac{1}{2} \cdot (1 - \beta^2) \cdot (1 + \beta)} \quad (2.14)$$

hvor $\beta = v_e/v_f$.

Med formel (2.14) er det lykkedes os at skrive mølleeffektiviteten som en funktion af én variabel β . Som tidligere nævnt må β være i intervallet $0 \leq \beta \leq 1$. Det er nu en simpel sag at finde maximum for C_P . Vi finder, at

$$\boxed{\text{Mølleeffektiviteten er maximal for } \beta = \frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

og at den maximalt opnåelige mølleeffektivitet er givet ved

$$\boxed{C_{P, \max} = \frac{16}{27} \approx 59\%} \quad (2.16)$$

VINDMØLLENS EFFEKTIVITET

Formel (2.16) fortæller, at det er umuligt at udnytte mere end ca. 59% af vindens energi i en vindmølle. Det er vigtigt at bemærke, at resultatet gælder for enhver type vindmølle. Vi har på intet sted i udledelsen af (2.16) gjort nogen speciel antagelse om vindmøllens konstruktion.

Størrelsen $C_{p,max}$ blev først beregnet af A.Betz i 1927 og kaldes derfor Betz' effektivitet.

Øvelse 2.1

Eftervis (2.15) og (2.16).

Øvelse 2.2

Antag, at vi opstiller en ideal mølle med mølleeffektivitet på 59% på et sted, hvor vinden blæser med $v_f = 5\text{m/sek}$.

Beregn følgende størrelser:

- Vindens effekt pr. m^2 foran møllen
- Vindens effekt pr. m^2 bagved møllen
- Møllens effekt pr. m^2 overstrøget areal
- Vindens hastighed på møllens plads
- Den resulterende vindkraft på møllen pr. m^2 overstrøget areal.

Gentag eventuelt beregningerne for $v_f = 10\text{ m/sek}$ og $v_f = 20\text{ m/sek}$.

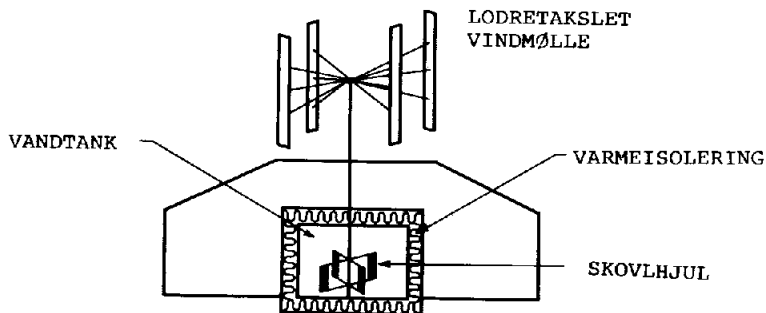
3. Vindmøllens funktion

1. Vindmøllers opbygning

I sidste kapitel udledte vi på basis af bevarelseslovene for masse, energi og impuls, at man maximalt kan udnytte 59% af vindens effekt. I dette kapitel skal vi se på, hvorledes en vindmølle virker i praksis.

Næsten alle vindmøller er opbygget af følgende hovedbestanddele:

- 1) Rotoren, der er en fællesbetegnelse for vinger plus mølleaksel. I rotoren omsættes vindens kinetiske energi til rotationsenergi i mølleakslen.
- 2) Energiomsætningssystemet, der omdanner rotationsenergien til den ønskede energiform. Hvis man ønsker at producere elektricitet, er energiomsætningssystemet en generator. Undertiden er hovedformålet med møllen at producere termisk energi. Man kan så undvære generatoren og i stedet benytte en såkaldt vandbremse.



Figur 3.1 Vindmølle med vandbremse

Når møllen drejer rundt, bremses den af skovlhjulene, der er anbragt i vandtanken.

- 3) Transmissionen eller gearet, der omsætter mølleakslens omdrejningshastighed til den hastighed, som en eventuel strømgenerator arbejder med. Denne del af møllen er ikke nødvendig, hvis møllen fungerer med en vandbremse.
- 4) Den bærende konstruktion, der tjener til at fastholde såvel rotor som de øvrige mølled dele i en passende højde over jordoverfladen.
- 5) Sikkerhedssystemet, der har til opgave at sikre mod, at møllen havarerer eller løber løbsk.

Det er klart, at rotoren er den centrale del af enhver vindmølle, og den følgende diskussion vil næsten udelukkende blive koncentreret herom.

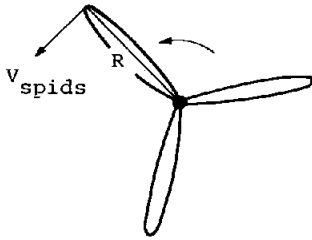
2. Mølleeffektivitet og hastighedsforhold

Inden vi går over til at beskrive de forskellige rotortyper, vil vi se nærmere på, hvorledes mølleeffektiviteten varierer, og hvad den afhænger af.

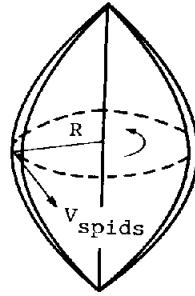
Ved en vindmølles spidshastighed v_{spids} - forstås hastigheden af de punkter på bladene, der befinder sig længst væk fra mølleakslen.

Hastighedsforholdet λ defineres som forholdet mellem den frie vindhastighed v_f og spidshastigheden v_{spids}

$$\lambda = \frac{v_f}{v_{spids}} \quad (3.1)$$



Figur 3.2(a) Rotor med vandret aksel.



Figur 3.2(b) Darrieus rotor.

I kapitel 2 så vi, at en vindmølle maximalt kan udnytte 59% af vindens energi. Møllens faktiske effekt afhænger af parameteren $\beta = v_e/v_f$, der fortæller, hvor meget vinden bliver bremset op ved passagen af møllens rotor. Spørgsmålet er så, hvorledes man i praksis kan variere β .

Lad os forestille os, at vi ser på en bestemt mølle, og at vinden blæser med den konstante hastighed v_f . Det er klart, at vi kan variere β ved at lade møllen snurre mere eller mindre hurtigt rundt - det vil sige ved at variere hastighedsforholdet λ . Der er altså i dette tilfælde en sammenhæng mellem mølleeffektiviteten C_p og det dimensionsløse hastighedsforhold λ . Men denne sammenhæng må også gælde for andre vindhastigheder. For det første må man for en bestemt mølle kunne beregne effektiviteten C_p ud fra hastighederne v_f og v_{spids} , da disse hastigheder er de eneste uafhængige størrelser, der kan varieres. For det andet er C_p en dimensionsløs størrelse. Det følger heraf, at C_p må afhænge af en dimensionsløs kombination af hastighederne v_f og v_{spids} - altså netop af λ . Der gælder med andre ord: For en given mølle er C_p en bestemt funktion af λ .

På figur 3.3 ser vi mølleeffektiviteter afbildet som funktion af hastighedsforholdet for en række forskellige mølletyper (Bugge, 1978). Disse mølleeffektiviteter er fundet ved nogle detaljerede aerodynamiske beregninger. I overensstemmelse med resultatet fra kapitel 2 er mølleeffektiviteten i alle tilfælde mindre end 59%. For hver af møllerne er der én bestemt værdi af λ , der giver maximal mølleeffektivitet.

Der er stor forskel på den bedste værdi af λ for de forskellige mølletyper. Det mest effektive hastighedsforhold er størst for møller med få og smalle blade i rotoren. Disse møller kaldes hurtigløbere. For at fange en stor del af vindens energi må møller med et lille bladareal naturligvis rotere hurtigere end f.eks. en traditionel hollandsk vindmølle.

De forskellige rotortyper, der er omtalt på figur 3.3 vil blive nærmere beskrevet i det følgende afsnit.

Mølleeffektiviteten varierer temmelig meget med spidshastighedsforholdet, og det er klart, at man i en god vindmølle på en eller anden måde må være i stand til at kontrollere omdrejningshastigheden, således at λ i størstedelen af driftstiden er tæt på den mest effektive værdi.

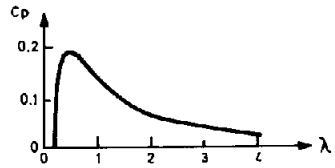
Øvelse 3.1

Lad os se på de 4 møller, hvis C_p -kurver er vist på figur 3.3.

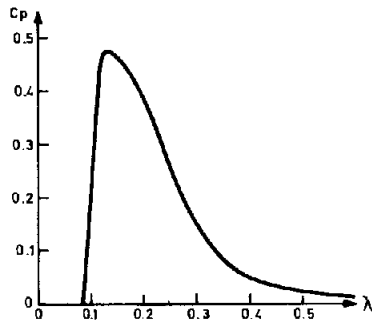
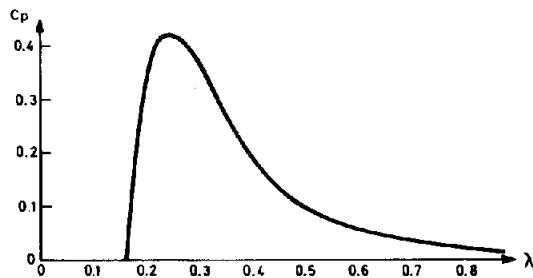
Antag, at alle møllerne er reguleret, således at C_p er maksimal ved vindhastigheden $v_f = 10$ m/s. Besvar følgende spørgsmål under forudsætning af, at vindhastigheden netop har denne værdi.

- Hvor stor er vindeffekten per m^2 ?
- Hvor stor er spidshastigheden for hver af møllerne?
- Hvilken effekt kan hver af møllerne producere per m^2 overstrøget areal?

MØLLEEFFEKTIVITETER

(a) SAVONIUS
ROTOR(b) HOLLANDSK
MØLLE

(c) HURTIGLØBER

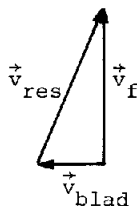
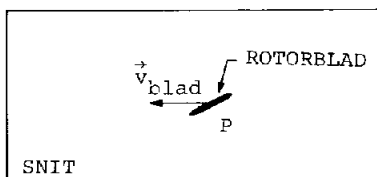
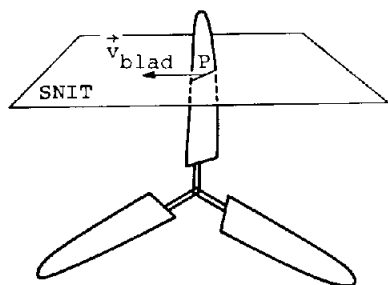
(d) DARRIEUS
MØLLE

Figur 3.3 Mølleeffektiviteten som funktion af hastighedsforholdet λ for forskellige mølletyper (Bugge, 1978).

3. Modstandsmøller

Som allerede omtalt i kapitel 1 findes der både vandretakslede og lodretakslede vindmøller med hver deres fordele og ulemper. Desuden skelnes der inden for hver af disse typer mellem modstandsmøller og opdriftsmøller, afhængigt af hvorledes vinden får rotoren til at dreje rundt. I dette afsnit omtaler vi modstandmøllers virkemåde, medens de noget mere komplicerede opdriftsmøller behandles i de to følgende afsnit.

Ved modstandsmøller er rotorbladene store plader, der er drejede lidt ud af rotorens plan. Når vinden passerer møllen skubber den simpelthen rotorbladene rundt.



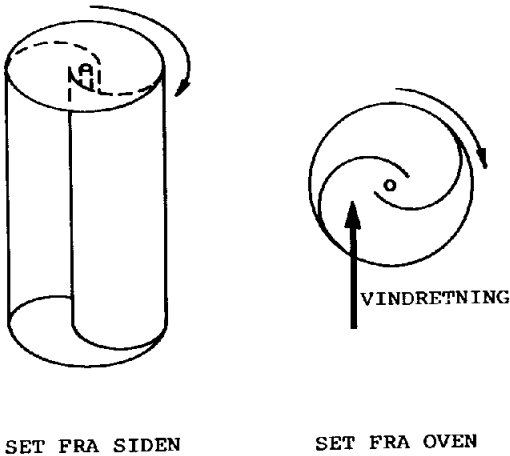
Figur 3.4(a) Modstandsrotor set forfra. Snittet er lagt vinkelret på et af rotorbladene.

Figur 3.4(b) Snittet fra figur 3.4(a) er her set ude fra rotorbladets spids. Hastigheden $\vec{v}_{\text{blad}}$ er bladets hastighed i punktet P. Hvis den frie vindhastighed er $\vec{v}_f$, vil vindens hastighed set fra P være lig med $\vec{v}_{\text{res}}$.

På figur 3.4(a) viser vi en skitse af en modstandsrotor set forfra. Snittet er lagt vinkelret på et af rotorbladene, og hastigheden $\vec{v}_{\text{blad}}$ er rotorbladets hastighed i det punkt P, hvor snittet skærer rotorbladet. På fig. 3.4(b) er snittet tegnet i papirets plan, så vi kan se, hvorledes rotorbladet er drejet i forhold til rotorplanen.

Som eksempler på modstandsmøller med vandret akse kan vi nævne den hollandske mølle (figur 1.4) og vindrosen (figur 3.9). Som vi skal se senere, har man dog ofte krummet møllvingerne en smule, sådan at man til en vis grad kan drage nytte af opdriftsprincippet også i disse møller.

Som eksempler på modstandsmøller med lodret akse kan vi nævne møllen på figur 3.1 og Savoniusrotoren på figur 3.5. Fordelen ved Savoniusrotoren er, at den ofte kan fremstilles af de forhåndenværende materialer. Det gør den trods dens lille effektivitet velegnet under primitive forhold som i U-landene.



Figur 3.5 Savoniusrotor

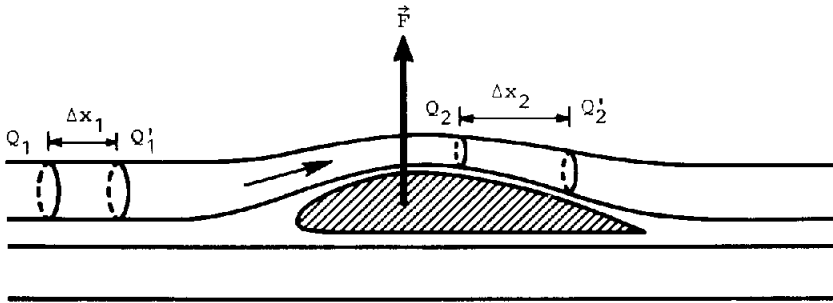
Det fremgår af figur 3.3, at modstandsrotorer drejer forholdsvis langsomt rundt. Det mest effektive hastighedsfor-

hold ligger i området 0.3-1.0. For at forstå baggrunden for det ser vi igen på figur 3.4(b). Vi har her konstrueret vindens hastighed $\vec{v}_{\text{res}}$ i forhold til hastigheden $\vec{v}_{\text{blad}}$ af punktet P på rotorbladet. Set fra punktet P er vindens resulterende hastighed givet ved $\vec{v}_{\text{res}} = \vec{v}_f - \vec{v}_{\text{blad}}$. Det følger af figuren, at hvis $v_{\text{blad}} \gg v_f$, så bliver $\vec{v}_{\text{res}}$ næsten parallel med rotorbladet, og møllen "løber fra vinden". I den situation vil vinden naturligvis ikke kunne drive møllen rundt.

4. Opdriftsprincippet. Bernoullis ligning

De mest effektive møller er hurtigløberne og Darrieusmøllerne. Rotoren består her af nogle få aerodynamisk udformede blade. Det giver yderligere den fordel, at møllekonstruktionen er forholdsvis let, og prisen bliver derfor mindre end for de tunge modstandsmøller.

Hurtigløberne og Darrieusmøllerne kaldes under et for opdriftsmøller efter den fysiske mekanisme, der får møllerne til at dreje rundt. Ideen bag dem er den samme, som benyttes ved konstruktion af flyvemaskinevinger. På figur 3.6 ser vi profilen af et mølleblad (eller en flyvemaskinevinge), der befinder sig i en luftstrøm, som går fra venstre mod højre. Bladprofilen er konstrueret usymmetrisk, idet den er næsten flad på undersiden og krum på oversiden. Denne konstruktion bevirker, at møllebladet bliver påvirket af en opadrettet kraft $\vec{F}$, når luften strømmer forbi (heraf navnet opdriftsmøller). For at forstå dette ser vi på to vindrør, et der går over møllebladet og et der går under møllebladet.



Figur 3.6 Mølleblad i luftstrøm

Betragt den luftmængde, der til et vist tidspunkt befinder sig i det øverste vindrør mellem punkterne Q_1 og Q_2 . Et kort tidsrum efter befinder den samme luftmængde sig mellem punkterne Q_1' og Q_2' . Da massen af hele luftmængden er den samme til de to tidspunkter, vil massen m af luftmængden i rørstykket Q_1Q_1' være den samme som massen af luftmængden i rørstykket Q_2Q_2' . Hvis vindrørets tværsnit ved Q_1 og Q_2 er henholdsvis A_1 og A_2 , betyder det, at

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 = \rho \cdot A_2 \cdot \Delta x_2 \quad (3.2)$$

idet ρ er luftens massefylde, og længden af rørstykket Q_1Q_1' er Δx_1 , og længden af rørstykket Q_2Q_2' er Δx_2 .

Som det fremgår af ligning (3.2) antager vi ligesom i kapitel 2, at luftens massefylde ikke ændres, når luften passerer møllebladet.

Massebevarelsen medfører altså, at volumen ΔV i de to rørudsnit er det samme:

$$\Delta V = A_1 \cdot \Delta x_1 = A_2 \cdot \Delta x_2 \quad (3.3)$$

VINDMØLLENS FUNKTION

Vi vil nu se på energiforholdene af den betragtede luftmængde i vindrøret. Ifølge arbejdssætningen vil tilvæksten ΔE_k i luftmængdens kinetiske energi være lig med det arbejde A , som omgivelserne udfører på luftmængden:

$$\Delta E_k = A \quad (3.4)$$

Omgivelserne til vores luftmasse er simpelthen den omkringliggende luftmængde. Ved endefladerne af luften mellem Q_1 og Q_2 er kraften givet ved henholdsvis $F_1 = p_1 A_1$ og $F_2 = p_2 A_2$, idet trykket ved Q_1 og Q_2 er givet ved p_1 og p_2 . Under flytningen bliver der derfor udført følgende arbejde på luftmængden:

$$A = p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 - p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta x_2 \quad (3.5)$$

Benytter vi her resultatet (3.3) af massebevarelsen kan arbejdet udtrykkes på formen

$$A = (p_1 - p_2) \cdot \Delta V \quad (3.6)$$

Luftmasserne ved siden af vindrøret påvirker selvfølgelig også vores luftmængde med en kraft. Trykkraften udfører ikke noget arbejde, da den er vinkelret på bevægelsesretningen. Der er også kræfter, der skyldes gnidning mellem de forskellige luftdele. Disse kræfter er ved normale trykforhold meget små, og vi ser bort fra dem. Vi ser også bort fra det arbejde, tyngdekraften eventuelt udfører, idet vi antager, at højdeforskellene i vindrøret er meget små.

Idet vores luftmængde føres frem fra rørstykket $Q_1 Q_2$ til $Q'_1 Q'_2$ vil forholdene være helt uændrede i rørstykket fra Q'_1 til Q_2 . Tilvæksten i luftmængdens kinetiske energi er

derfor givet ved

$$\begin{aligned}\Delta E_k &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot (v_2^2 - v_1^2)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Indfører vi ligningerne (3.6) og 3.7) i arbejdsætningen (3.4) får vi

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta V (v_2^2 - v_1^2) = (p_1 - p_2) \cdot \Delta V$$

Denne ligning medfører, at

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (3.8)$$

Ligning (3.8) kaldes Bernoullis ligning. Den udtrykker, at summen af trykket p og den kinetiske energi per rumfangs-enhed $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ er konstant i et vindrør.

Bernoullis ligning:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konstant}$$

Det er klart, at Bernoullis ligning gælder uanset, hvilket vindrør der betragtes, og vi vil nu se, hvorledes det følger, at møllebladet bliver påvirket af en resulterende kraft, der er opadrettet. På fig. 3.7(a) ses et fotografi, der viser, hvorledes vinden strømmer forbi møllebladet (eller flyvemaskinevingen). Da møllebladet er fladt på un-

dersiden vil vinden i et vindrør under møllebladet passere dette uforstyrret. Vindhastigheden vil være konstant gennem hele røret, og det følger derfor af Bernoullis ligning, at trykket også vil være uforandret. Trykket under møllebladet er det samme som trykket foran møllebladet.



(a)



(b)

Figur 3.7 Strømbilleder omkring vingeprofil

Ser vi på et vindrør lige over møllebladet vil der gælde, at hastigheden v_2 her er større end hastigheden v_1 foran bladet. Som følge af bladets krumning skal luften tilbagelægge større vejlængde per tidsenhed over bladet end foran (og bagved) bladet. Dette giver sig udtryk ved, at vindrøret er smallere over møllebladet. Det følger så af Bernoullis ligning, at trykket p_2 over bladet er mindre end trykket p_1 foran møllebladet. Sammenholder vi resultaterne i de to vindrør, får vi, at møllebladet bliver påvirket af en resulterende kraft, der er opadrettet.

På figur 3.7(b) ser vi, hvad der sker, hvis vinden rammer skråt ind mod bladet. I dette tilfælde løsriver strømmingen fra oversiden af bladet (vingen), og de enkelte luftdele bevæger sig stærkt uregelmæssigt, sådan at der dannes lufthvirvler over og bag vingen - man siger kort, at der opstår turbulens i luftstrømningen. Resultatet er, at opdriften forsvinder. Er der tale om en flyvemaskine, kan man forestille sig at flyet prøver at stige for hurtigt. Vinden

vil da ramme skråt ind mod vingerne med det resultat, at opdriften forsvinder, og flyet styrter ned. Med et engelsk udtryk siger man, at flyet "staller" i denne situation.

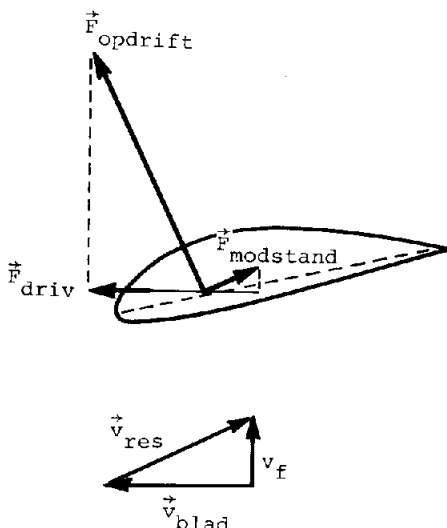
5. Opdriftsmøller

For at forstå hvornår de forskellige strømningsformer på figur 3.7 opstår ved en vindmølle, ser vi på figur 3.8 møllebladets profil i forhold til dets egen hastighed $\vec{v}_{\text{blad}}$ og i forhold til vindhastigheden $\vec{v}_f$. Ligesom ved modstandsmøllen på figur 3.4(b) vil vindens hastighed i forhold til vingeblandet være givet ved den resulterende vindhastighed $\vec{v}_{\text{res}}$ på figur 3.8.

Når $\vec{v}_{\text{blad}}$ er større end vindhastigheden $\vec{v}_f$, vil $\vec{v}_{\text{res}}$ være næsten parallel med korden i vingeprofilen. Strømningsbilledet svarer da til figur 3.7(a). I denne situation bliver vingen påvirket af en opadrettet kraft, som kan opløses i en modstandskraft $\vec{F}_{\text{modstand}}$, der har samme retning som $\vec{v}_{\text{res}}$, og en herpå vinkelret kraft $\vec{F}_{\text{opdrift}}$. Ved at projicere modstandskraft og opdriftskraft ind på bevægelsesretningen (givet ved $\vec{v}_{\text{blad}}$) finder man den resulterende drivkraft $\vec{F}_{\text{driv}}$. Drivkraften vil enten søge at accelerere eller bremse vingen alt efter, om den er ensrettet med eller modsat rettet $\vec{v}_{\text{blad}}$. Når møllen drejer rundt med konstant omdrejningshastighed, bliver drivkraften ophævet af den belastning, som kommer enten fra strømgeneratoren eller fra vandbremsen.

Man kan vise, at opdriftens størrelse er proportional med $v_{\text{res}}^2 \cdot \Delta A$, hvor ΔA er vingeearealet. Det er altså muligt at opnå en stor opdrift, selvom vingeearealet er lille, men det forudsætter, at vingen snurrer hurtigt rundt. Det er denne situation, der svarer til strømningsbilledet på figur 3.7(a). Der er dog naturligvis grænser for, hvor hurtigt en opdriftsmølle kan rotere. Af figur 3.8 ser vi, at hvis $\vec{v}_{\text{blad}}$ bliver meget stor i forhold til $\vec{v}_f$, bliver $\vec{v}_{\text{res}}$ i det væsentlige parallel med $\vec{v}_{\text{blad}}$. Og da $\vec{F}_{\text{opdrift}}$ er vinkelret

på $\vec{v}_{\text{res}}$, bliver der i denne situation ingen drivkraft, og resultatet er, at møllen bliver bremsat.



Figur 3.8 Møllevingens orientering i forhold til $\vec{v}_f$. Ligesom på figur 3.4 er møllevingen set fra møllespidsen ind mod mølleakslen. Idet vingens hastighed er $\vec{v}_{\text{blad}}$, vil vindens hastighed set fra vingen være lig med $\vec{v}_{\text{res}}$. Drivkraften $\vec{F}_{\text{driv}}$ er parallel med $\vec{v}_{\text{blad}}$.

I den modsatte situation, hvor $\vec{v}_{\text{blad}}$ er lille i forhold til $\vec{v}_f$, vil $\vec{v}_{\text{res}}$ ramme ret skråt ind mod vingen. Dette resulterer i, at der omkring vingen opstår et strømningsbillede som på figur 3.7(b). I denne situation vokser modstandskraften og opdriften aftager. Det følger heraf, at opdriftsmøller er ineffektive, hvis $\vec{v}_{\text{blad}}$ er lille i forhold til $\vec{v}_f$, altså hvis hastighedsforholdet er stort.

På grund af dette forhold kan der være problemer forbundet med at få en opdriftsmølle til at gå igang. I reglen klares dette dog ved at kantstille vingerne en smule (se figur 3.8), således at møllen kan fungere som en almindelig modstandsmølle i denne situation.

Darrieusrotoren er også af opdriftstypen, selv om det ikke er helt simpelt at forstå, hvorledes den fungerer i praksis. Dette emne vil vi ikke gå ind på her, men nøjes med at henvise interesserede til en fortrinlig bog af J. Bugge (Bugge, 1978). Darrieusmøllens maksimaleffekt synes at være lidt mindre end hurtigløberens (jfr. figur 3.3). Fordelen ved denne mølletype er, at den formodentlig vil kunne fremstilles billigt i serieproduktion, hvilket hænger sammen med, at de tungeste mølledele (gear og generator) kan anbringes nede på jorden.

Mange langsomtgående propelmøller, som man i første omgang ville karakterisere som modstandsmøller, drager også i nogen grad nytte af princippet bag opdriftsmøllerne. Det gælder f.eks. vindrøsen på figur 3.9. Rotorbladene består her af plader ligesom i de rene modstandsmøller, men pladerne er gjort en smule krumme. Med den hule side vendt mod vinden kan man forestille sig, at der vil virke en lille opdriftskraft på bladet af den type, vi har diskuteret i dette afsnit. Tilsvarende bemærkninger gælder om den hollandske vejrmølle, klapsejleren og den almindelige markvandingpumpe.

Som tidligere nævnt er der to meget væsentlige fordele ved de hurtigtløbende opdriftsmøller, nemlig at de kan køre med betydelig større effektivitet end modstandsmøllerne, og



Figur 3.9 Rotordelen af vind-
rose (Nordisk Pressefoto)

at deres udformning kræver et forholdsvis lille materialeforbrug. Langt de fleste af de møller, der bygges herhjemme i disse år, er da også af denne type, og dette gælder både små og store møller, inklusive de tidligere omtalte Nibemøller, samt Tvindmøllen. Til specielle formål her i landet (f.eks. til markvanding) eller til brug i U-lande, er man ikke ude efter den højst opnåelige effektivitet. Man ønsker snarere et simpelt og robust energianlæg, der kan opretholde en begrænset, men stabil energiforsyning. Under disse betingelser vil en primitiv modstandsmølle ofte være at foretrække fremfor en mere avanceret hurtigløber. Det bør nævnes, at der i Danmark er flere grupper, der har udført et stort arbejde med at udvikle vindmøller, der er egnede til forskellige U-lande. Således har f.eks. Værløse-gruppen udviklet en type, der vil kunne fremstilles på grundlag af genbrugsdele (olietønder, gamle bildæk o.s.v.) og af lokale håndværkere.

6. Energiomsætningssystemet

Som nævnt i indledningen til dette kapitel består energiomsætningssystemet i reglen af en generator eller en vandbremse, der har til formål at omsætte rotorens kinetiske energi til den ønskede energiform. Vi skal her nøjes med at fremkomme med nogle få bemærkninger om dette emne; er man interesseret i flere tekniske detaljer, kan man f.eks. studere referencerne (Bugge, 1978 og Herforth, 1976).

Ved enhver vindhastighed vil møllens omdrejningshastighed naturligvis være bestemt af, at belastningen fra energiomsætningssystemet netop er lig med den effekt, som rotoren overtager fra vinden. Det afgørende for møllens driftsmåde er derfor, hvorledes belastningen varierer med omdrejningshastigheden.

Driftsmåde 1: Fast hastighedsforhold.

Består energiomsætningssystemet af en vandbremse, vil belastningen variere på en sådan måde, at v_{spids} er proportional med v_f , m.a.o. hastighedsforholdet $\lambda = \frac{v_f}{v_{spids}}$ forbliver konstant. Møllen vil altså populært sagt "løbe op i vinden", indtil vindhastigheden når op på sin maksimalt tilladte værdi. Ved endnu større vindhastigheder bringes møllen til standsning, f.eks. ved at vingerne kantstilles eller ved at hele rotoren drejes ud af vinden.

Driftsmåde 2: Fast omdrejningstal.

Består energiomsætningssystemet derimod af en asynkron generator, der er tilkoblet det offentlige elnet, vil møllen i stedet komme til at køre med et (næsten) konstant omdrejningstal. Dette skyldes, at vekselstrømmen i elnettet (med frekvensen 50 Hz) leverer magnetiseringsstrømmen til den asynkrone generator og herved giver den et fast ("synkront") omdrejningstal. Når vinden driver rotoren og dermed generatoren rundt, vil dette synkrone omdrejningstal kun kunne overskrides ganske lidt, før modstanden vokser så stærkt med omdrejningshastigheden, at møllen bremses.

Det skal bemærkes, at der også i dette tilfælde er brug for et sikkerhedssystem, der kan standse møllen. F.eks. kan der jo ske et strømsvigt eller generatoren kan gå i stykker; i begge tilfælde ophører pludselig belastningen fra energiomsætningssystemet, og rotorens omdrejningshastighed vil følgelig stige voldsomt. Dette kan hurtigt føre til et alvorligt haveri, hvis ikke der findes effektivt fungerende sikkerhedsudstyr.

4. Danmarks vindressourcer

1. Indledning

Før vi tager stilling til, hvor stor en energimængde, vi kan tappe fra vinden over Danmark, må vi se nærmere på de danske vindforhold. Det er selvfølgelig vigtigt at kende den totale energi, der er bundet i vinden. Men nok så vigtigt er det at kende vindens geografiske og tidsmæssige fordeling. Den geografiske fordeling er vigtig, fordi man naturligvis først må tilstræbe at placere møllerne i de områder, hvor vinden blæser kraftigst. Dertil kommer, at der er grænser for, hvor tæt det kan betale sig at placere møllerne på hinanden. Hvis møllerne placeres for tæt på hinanden, vil de læ for vinden, således at deres kapacitet bliver nedsat. Man kan altså få mere ud af vinden, hvis den er jævnt fordelt over landet, end hvis den er koncentreret på begrænsede områder. Vindens tidsmæssige fordeling er vigtig, fordi det i praksis er vanskeligt at lagre energien over længere tidsrum. Det hjælper ikke med store vindhastigheder, hvis de forekommer i perioder, hvor energibehovet er lille.

Hvis man skal vurdere energiproduktionen af en vindmølle på et bestemt sted, er der endnu et vigtigt forhold, der spiller ind. Det viser sig, at møllens energiproduktion afhænger stærkt af den detaljerede fordeling af de forskellige vindhastigheder. Dette forhold vil vi se på i det følgende afsnit, hvor vi sammenligner vindens hastigheds- og effektfordeling på en bestemt lokalitet.

2. Vindens hastigheds- og effektfordeling

I kapitel 2 afsnit 2 regnede vi ud, at vindens effekt P_0 i et vindrør med tværsnitsareal A er givet ved

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Vindhastigheden er v og ρ er luftens massefylde.

Vindens effekt per m^2 er altså givet ved

$$\frac{P_0}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.1)$$

Det følger af dette udtryk, at effekten stiger voldsomt med voksende vindhastighed. Det betyder, at en vindmølle normalt ikke vil levere den største energi ved den hyppigste vindhastighed. Større vindhastigheder kan udmærket levere de største energimængder, selv om de forekommer i forholdsvis små tidsrum.

Som en konkret illustration af dette forhold ser vi i den følgende øvelse på vindens hastigheds- og effektfordeling ved vejrstationen Tranebjerg.

Øvelse 4.1Vindens hastigheds- og effektfordeling ved Tranebjerg

Tabel 4.1 viser hyppigheden q af forskellige vindhastigheder v observeret i årene 1931-60 i 10 m's højde ved Tranebjerg. Hyppigheden q angiver den procentdel af tiden, hvor

vindhastigheden er i et givet hastighedsinterval. Vindhastighederne er vurderet efter Beaufort's skala, der går fra 1 til 12. Sammenhængen mellem vindstyrken målt efter Beaufort's skala og vindhastigheden målt i m/s er givet i tabellen.

Tallene er taget fra rapporten "Danmarks Klima, I Vind" (Frydendahl, 1971). Denne rapport indeholder detaljerede målinger foretaget ved samtlige danske vejrstationer i perioden 1931-60.

- a) Afbild observationerne fra tabel 4.1 i et (v, q) -diagram. Man kan for hvert hastighedsinterval vælge intervalmidtpunktet som repræsentativ hastighedsværdi.

Vindstyrke F (Beaufort)	v (m/s)	q (%)	e (W/m ²)	C _P	e _m (W/m ²)
0	0,0-0,2	7,2			
1	0,3-1,5	17,5			
2	1,6-3,3	20,3			
3	3,4-5,4	21,5			
4	5,5-7,9	16,6			
5	8,0-10,7	10,0			
6	10,8-13,8	4,3			
7	13,9-17,1	1,8			
8	17,2-20,7	0,6			
9	20,8-24,4	0,2			
10	24,5-28,4	0,1			
11	28,5-32,6	0,0			
12	> 32,7	0,0			

Tabel 4.1 Hyppigheden af forskellige vindhastigheder ved Tranebjerg.

Vindhastigheden er lig med (eller næsten lig med) v i procentdelen q af tiden. Bidraget e til vindens effekt per m² fra vindhastigheder i nærheden af v bliver derfor i middel lig med

$$e = \frac{P_0}{A} \cdot q$$

$$= \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3\right) \cdot q$$

- b) Udregn e ved de forskellige vindhastigheder og afbild resultatet i et (v, e) -diagram.
- c) Sammenlign den hyppigste vindhastighed med den vindhastighed, der i middel giver den største effekt.

Øvelse 4.2

På denne lokalitet tænkes opført en vindmølle (hurtigløber) med fast omdrejningstal og med en effektivitetskurve, som vist på figur 3.3(c). Andre oplysninger om møllen:

Møllens radius: 5 meter

Møllens faste omdrejningstal: 76 omdr./minut

Møllen standses, når vindhastigheden overstiger 24m/sek.

Ingen energitab i gear og generator.

- d) Find møllens vingespidshastighed
- e) Tegn C_p som funktion af vindhastigheden i et (v, C_p) -diagram
- f) Find den vindhastighed, hvor møllen starter
- g) Find den procentdel af tiden, hvor møllen er i drift
- h) Aflæs ud af kurven i (v, C_p) -diagrammet, hvilke C_p værdier, der hører til de i tabel 4.1 angivne vindintervaller. Indfør de fundne værdier i den dertil indrettede søjle i tabel 4.1.

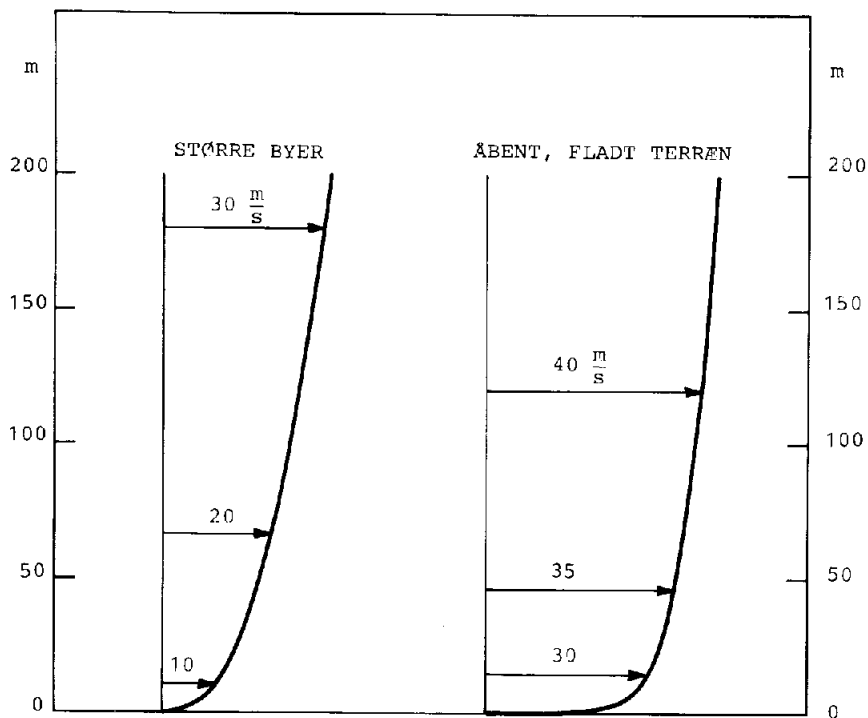
- i) Find bidraget e_m til møllens effekt pr. m^2 fra hver af disse vindintervaller. Hvad bliver middeleffekten pr. m^2 ?
- j) Beregn møllens årlige energiproduktion. Angiv resultatet i kWh/år.

3. Vindens geografiske fordeling

På figur 4.1 ser vi middelværdien af vindhastigheden forskellige steder i Danmark.

Middelvindhastigheden varierer temmelig meget fra kystområderne til de indre områder af landet. Forholdet mellem den største og den mindste middelvindhastighed er $6,0/3,2 \approx 1,9$. Det tilsvarende forhold for vindens effekt per m^2 bliver $(6,0/3,2)^3 \approx 6,6$. Selv om der, som vi så det i det foregående afsnit, ikke er nogen direkte sammenhæng mellem middelhastigheden og middeleffekten, viser dette dog, at det betyder utroligt meget, hvor man placerer vindmøllerne. Hvis man beslutter sig til at udnytte vindenergien i stor stil til dækning af en del af landets energibehov, skal møllerne placeres så tæt på kysterne som muligt.

De lokale terrænforhold er også af stor vigtighed. Huse og træer nedsætter vindhastigheden kraftigt. Hvor meget dette betyder, ser vi illustreret på figur 4.2.

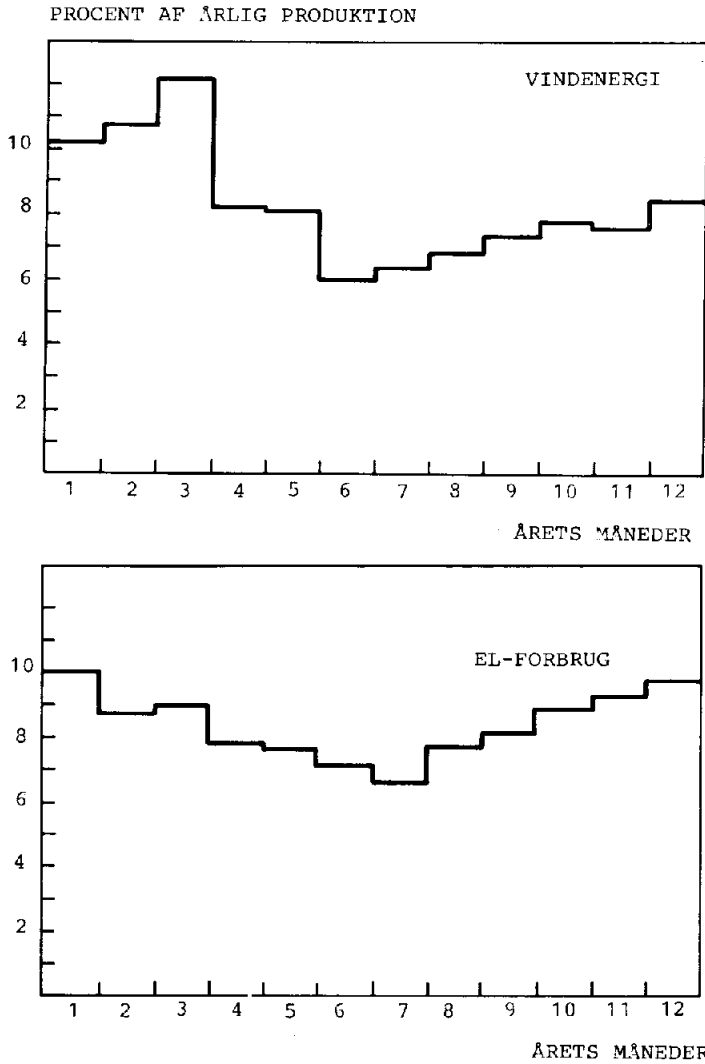


Figur 4.2 Vindprofiler over forskellige terrænformer.

4. Vindens variation gennem årets måneder

Figur 4.3 viser, hvorledes vindens effekt per m^2 (det vil sige størrelsen P_0/A) varierer gennem årets måneder. Målingerne er foretaget i 56 m's højde over Risø i perioden 1958-67.

Vi lægger mærke til, at mønstret i variationen gennem årets måneder umiddelbart gør vindenergien til én af de mere lovende former for alternativ energi. Der er klart en større effekt i vintermånederne end i sommermånederne, således at vindeffekten er størst i den del af året, hvor



Figur 4.3 og 4.4 Energiproduktionen af en vindmølle ved Risø sammenlignet med fordelingen af Danmarks el-forbrug på årets måneder.

energibehovet er størst. Dette illustreres yderligere ved figur 4.4, der viser, hvor stor en del af landets samlede elforbrug, der falder i årets forskellige måneder.

Variationsmønsteret i vindenergien følger altså i grove træk vores behov for energi, således som det ændrer sig gennem årets måneder. De små afvigelser er ikke særligt vigtige, hvis vi kun vil bruge vindenergien som et supplement til andre energiformer. Kun hvis vi vil udnytte vinden som en hovedleverandør af energi, vil der blive behov for at kunne lagre vindenergien fra de mere vindrige måneder til de mere vindstille måneder.

5. Størrelsen af vindeffekten og energibehovet

For at vurdere hvor stor en energi, man maximalt kan tappe af vinden over Danmark, skal man løse følgende problemer:

- 1) Man skal kende den totale vindeffekt over Danmark,
- 2) man skal kende den effektivitet, hvormed vindenergien kan udnyttes, og 3) man skal vide, hvor tæt man kan stille vindmøllerne, uden at de forstyrrer hinanden i nævneværdig grad.

Punkterne 1) og 2) er forholdsvis lette at besvare. Vindeffekten er målt mange steder, og man kan f.eks. tage vindeffekten over Tranebjerg som repræsentativ for hele landet. Angående udnyttelseseffektiviteten har vi i kapitel 2, afsnit 3 vist, at det fysisk set er muligt at udnytte maximalt ca. 59% af vindens energi. I praksis kan man kun med meget store anstrengelser komme op over 30% på årsbasis. Blandt andet står møllen jo stille, både når det blæser for lidt og når det blæser for meget. Og selv når møllen er i drift, er virkningsgraden ikke den ideelle (se figur 3.3). Endelig sker der også et energitab i gear og generator, hvis møllens formål er elproduktion, hvad der er det sædvanlige.

Den størrelse, man ved mindst om, er møllernes lævirkning. Spørgsmålet er her, hvor stort et møllevingeareal (d.v.s. overstrøget areal) man kan udnytte i forhold til landets areal. Vurderingerne varierer fra $1/40$ til $1/1000$. I disse vurderinger indgår blandt andet forskellige antagelser om møllernes maximale højde. Den mest optimistiske vurdering siger altså, at man kan have et møllevingeareal, der udgør $1/40$ af landets areal, uden at den enkelte mølles energiproduktion reduceres nævneværdigt (Jensen, 1954). Den mest pessimistiske vurdering siger derimod, at møllernes effektivitet nedsættes betydeligt, hvis det samlede mølleareal udgør mere end $1/1000$ af landets areal (Johansson, 1974).

Lægger man den mest pessimistiske vurdering af mølletætheden til grund, får man på grundlag af det ovenstående, at vi i Danmark maksimalt kan producere elektrisk energi af størrelsen 32 TWh per år. På grundlag af den optimistiske vurdering får man, at vi maksimalt kan producere elektrisk energi af størrelsen 800 TWh per år. Til sammenligning var landets totale el-forbrug i 1978 på 21,5 TWh. Her til kommer så, at man eventuelt også kunne anbringe vindmøller ude på havet, hvor vindens effekt i reglen er stor.

Vi ser altså, at der teknisk set ikke er noget i vejen for, at vi kan dække en meget stor del af vores samlede energiforbrug ved hjælp af vindenergien. Det er et helt andet spørgsmål, om det økonomisk og miljømæssigt kan betale sig at gøre vindenergien til én af vore vigtigste energikilder. Desuden må man finde ud af, i hvor høj grad det energiøkonomisk kan betale sig at udnytte vindenergien. Spørgsmålet er her, hvor stor energi, der skal bruges for at etablere et system af vindmøller med tilhørende energilagre i forhold til den energi, der skal til for at etablere de tilsvarende produktionsapparater for de andre energisystemer.

5. Økonomi og miljø

Når man ser på spørgsmålet, om det kan betale sig at udnytte vindenergien, kan man anlægge to principielt forskellige synspunkter. Man kan for det første spørge, om det rent pengeøkonomisk kan betale sig at udnytte vindenergien - altså om det er rentabelt at bygge vindmøller. Og man kan spørge, om det energiøkonomisk er fornuftigt at bygge de nødvendige vindkraftanlæg.

Spørgsmålet om vindmøllers rentabilitet afhænger af størrelser som prisen på olie, kul og uran. Det afhænger af anlægsomkostningerne for vindkraftanlæg set i forhold til de tilsvarende omkostninger for kraftværker, der bygger på andre energikilder. Og det afhænger af den til enhver tid gældende bankrente. I alle disse spørgsmål er der tale om menneskeskabte forhold, som vi i hvert fald principielt selv er herrer over. Sagt på en anden måde afgøres spørgsmålet om vindmøllernes rentabilitet i høj grad af politiske forhold og beslutninger.

På langt sigt er det nok et vigtigere spørgsmål, om det energiøkonomisk kan betale sig at udnytte vindenergien. Det drejer sig i denne sammenhæng om at vurdere den energi, der anvendes ved anlæg af vindkraftanlæg, set i forhold til den energi, der anvendes ved produktion af andre kraftværker af tilsvarende størrelse.

1. Pengeøkonomi

Vi møder i energidebatten ofte stærkt modstridende påstande om rentabiliteten både af vindmøller og andre energianlæg, der bygger på de vedvarende energikilder.

En fløj i debatten hævder, at der allerede nu er god økonomi i at opbygge et stort antal vindenergianlæg, men henviser i øvrigt til at sædvanlige privatøkonomiske overvejelser er utilstrækkelige i denne sammenhæng, hvor samfundsøkonomiske og politiske synspunkter bør have den afgørende vægt. En anden fløj påstår derimod, at vindmøller er uøkonomiske, og at de næppe nogensinde kommer til at spille en afgørende rolle i landets energiforsyning.

Det er klart, at en stor del af uenigheden bunder i fundamentalt forskellige opfattelser af, hvordan samfundet skal indrettes og fungere, altså i hvilke værdier vi skal prioritere højest. Men især for de større vindkraftanlægs vedkommende er der faktisk stor usikkerhed om en række af de størrelser, der indgår i de økonomiske analyser. Det gælder f.eks. møllernes 1) anskaffelsespris, 2) levetid, 3) årlige energiproduktion og 4) årlige drifts- og vedligeholdelsesudgifter. Og som et meget usikkert moment har vi prisen på fossilt brændsel (eller eventuelt uran). For at lave en fuldstændig vurdering af en mølles rentabilitet, skal man kende prisen på brændsel over hele møllens levetid, og dette er naturligvis umuligt.

For at få bedre hold på nogle af de usikre størrelser foregår der rundt om i verden mange forsøg med store møller, der skal tilkobles det offentlige elektricitetsnet. For Danmarks vedkommende kan vi nævne møllerne i Tvind og Nibe. Disse udviklingsarbejder og forsøg vil i løbet af nogle år resultere i, at vi får et langt bedre kendskab til de ovenfor nævnte størrelser 1)-4). Man vil så til sin tid kunne foretage en noget sikrere bedømmelse af de økonomiske forhold, end man er i stand til i dag.

Kommer man til den konklusion, at store vindmøller er rentable (inden for den usikkerhedsmargin, der altid vil være til stede), er det regeringens erklærede hensigt at

opbygge et større antal vindkraftanlæg her i landet i sidste halvdel af firserne. Det anslås (ATV, 1977), at 10-15% af landets elforbrug (svarende til 2-3% af hele energiforbruget) vil kunne dækkes af store vindmøller, der kører deres elproduktion direkte ind på nettet.

Vender vi os dernæst mod de små private vindmøller til delvis forsyning af fritliggende gårde eller huse med elektricitet og varme er situationen noget anderledes. Således fremstilles og sælges der allerede nu et ikke ubetydeligt antal af sådanne møller, hvorfor man har en ret præcis viden om anlægspris og årlig energiproduktion; det er mere usikkert, hvor lang levetid de nuværende møller kan forventes at have, men i almindelighed antages noget i retning af 20-25 år.

En egentlig økonomisk analyse er naturligvis også her meget vanskelig (først og fremmest p.g.a. usikkerhed m.h.t. brændselsprisen i fremtiden), men derimod er vi i stand til at lave en kvalificeret sammenligning af økonomien i en vindmølle med økonomien ved andre måder at spare brændsel på (isolering etc.).

Lad os som udgangspunkt forestille os en gård eller et hus (eventuelt en klynge huse), der er totalt uisolerede, og som opvarmes på traditionel måde, d.v.s. ved hjælp af oliefyrr eller elvarme. Den årlige energiregning vil være meget stor, og ejeren ønsker naturligvis at gøre noget for at formindske den. En lang række muligheder foreligger: Han/hun kan f.eks. vælge at isolere gulv, vægge og loft; vinduernes 1 lag glas kan erstattes med 2 eller endog 3 lag glas, og endelig kan der også installeres en solfanger eller en vindmølle. Spørgsmålet er nu: I hvilken rækkefølge bør investeringerne foretages, når ejeren naturligvis først vil foretage de foranstaltninger, der har den korteste Simple Tilbagebetalingstid. Den Simple Tilbagebetalingstid defineres her som forholdet mellem investeringen og brændselsbesparelsen det første år.

For de mest almindelige isoleringsarbejder ved efterisolering af eksisterende boliger kan opstilles en liste over nødvendige investeringer og heraf følgende besparelser.

Listen er opskrevet i tabel 5.1 og oplysningerne heri er baseret på omfattende undersøgelser og vurderinger (Boligministeriet 1978). Priserne i Boligministeriets rapport er 1978-priser, men da disse priser må formodes stort set at følge den almindelige prisudvikling (ca. 15% stigning om året), har vi i tabellen angivet de tilsvarende beregnede 1980-priser.

Isoleringens tykkelse - svarende til mm mineraluld - er angivet før og efter arbejdets udførelse. I tabellen er der regnet med at 1 kwh koster 0,30 kr, hvilket er nogenlunde korrekt i øjeblikket for termisk energi, der leveres fra et privat oliefyr.

	<u>Isolering</u> Før Efter	<u>Investering</u> (1980 kr/m ²)	<u>Besparelse</u> (kwh/m ² /år)	<u>Simpel Tilbage-</u> <u>betalingstid</u> (år)
<u>Lofter</u>	0 200 50 200 100 200	73 59 42	85 27 12	2.9 7.3 11.7
<u>Yder-</u> <u>vægge</u>				
Hulmur	0 80	55	81	2.3
Massiv Tegl	0 125	290	70	13.8
<u>Gulve</u>	0 100 50 100	55 42	50 12	3.7 11.7
<u>Vinduer</u>				
Glasud-				
skiftning	1 lag 2 lag 1 " 3 "	396 594	233 309	5.7 6.4
Total-				
skiftning	1 " 3 "	1980	309	21

Tabel 5.1 Rentabilitet ved isolering af bolig.

Hvor omtrent ligger nu en vindmølle i dette skema? Svaret herpå gives i tabel 5.2, der opgiver pris og forventet årsydelse for en række mindre vindmøller, som kan købes i dag. Endvidere er opgivet den simple tilbagebetalingstid, der altså er forholdet mellem møllens pris og værdien af 1. års brændselsbesparelse. Også her sættes 1 kWh til 30 øre.

Mølle	Overstrøget areal (m ²)	Investering (1980 kr)	Energiprod. (kWh/år)	Tilbagebe- talingstid (år)
Riisager	80	120.000	44.000	9.0
Herborg Vindkraft	80	127.000	50.000	8.5
Kongsted Møllen	80	140.000	50.000	9.3

Tabel 5.2 Nogle vindmøllers Simple Tilbagebetalingstid^(**)

Ved at sammenligne tabellerne 5.1 og 5.2 må vi konkludere, at der er adskillige brændselsbesparende foranstaltninger, der er mere rentable end anskaffelsen af en vindmølle - selv på vindrige steder. Dette medfører selvsagt ikke, at små vindmøller er uøkonomiske, for brændselsprisen kan forventes at stige kraftigt også i de kommende år. Derimod betyder det, at husets (eller husenes) isoleringsstandard bør bringes op på et rimeligt niveau, før det kan forsvares at anskaffe en vindmølle.

(*) ^{glas.}Footnote til Tabel 5.1. Isoleringen er angivet i mm mineraluld; for vinduernes vedkommende dog i antallet af lag

(**) Den angivne energiproduktion forudsætter, at møllen er placeret på et sted med gode vindforhold.

2. Energiøkonomi

En vindmølle producerer nyttig energi, men der er naturligvis også medgået en betydelig energimængde til at lave vindmøllen. Der er brugt energi til produktionen af de nødvendige basisprodukter (såsom beton, stål, aluminium, glasfiber etc.) såvel som til selve mølleproduktionsprocessen (herunder opvarmning af fabrikslokaler etc.). For at der kan være en mening i at bygge en vindmølle, må denne naturligvis være i stand til at producere betydelig mere energi i løbet af sin levetid end den energi (møllens energiværdi), der alt i alt er investeret i den.

Møllens energiværdi er således en vigtig størrelse, som kan bestemmes med en rimelig nøjagtighed, fordi der de senere år er lavet en række internationale undersøgelser af energiværdien for de førnævnte basisprodukter. Nogenlunde repræsentative gennemsnitsværdier er angivet i nedenstående tabel (Elbek, 1974).

Produkt	Energiværdi (kWh/kg)
Alm. stål	13
Aluminium	78
Kobber	19
Glasfiber	30
Beton	0.5

Tabel 5.3 Energiværdier for basisprodukter

Det er en meget vanskelig sag at vurdere den energi, der er medgået til alle led i fabrikationen og opførelsen af møllen, men heldigvis er dette beløb væsentligt mindre end energien i basisprodukterne. Følgelig behøver vi ikke at være særlig nøjagtige, men kan nøjes med en tommelfingerregel

(Elbek, 1979), som kan formuleres på denne måde:

Energiforbruget, der medgår til produktion af en vare,
der koster 1 kr. (af fabrik), svarer i gennemsnit til
0,1 kWh.

Lad os nu som eksempel betragte en mindre vindmølle af samme slags som dem, der er nævnt i tabel 5.2. Der er naturligvis nogen forskel på deres opbygning, men ifølge oplysninger fra foreningen "Danske Vindkraftværker" er der typisk medgået materialer og hertil hørende energimængder, som vist i tabel 5.4.

	<u>Energiværdi (kWh)</u>
<u>Mast</u>	
2 tons stål	26.000
<u>Maskinkabine</u>	
1 tons stål	13.000
25 kg kobber	500
<u>Vinger</u>	
250 kg glasfiber	7.500
<u>Fundament</u>	
30 tons beton.	15.000
<u>Fabrikation</u>	
120.000 kr $\times$ 0,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{kr}}$	<u>12.000</u>
<u>ialt</u>	<u>74.000 kWh</u>

Tabel 5.4 Energiværdi for 22 kW vindmølle

Møllen forventes at kunne producere en energimængde på ca. 40-50.000 kWh pr. år. Sammenholdes dette tal med resultatet i tabel 5.4 ses, at møllen energimæssigt set vil kunne betale sig selv tilbage efter ca. 1 1/2 års forløb.

Det skal igen understreges, at den mølle vi har regnet på er en slags gennemsnit af dem, der er på markedet i dag.

Der findes således adskillige møller, der er betydeligt mere energiøkonomiske, f.eks. fordi tårnet er lavet af beton eller fordi vingerne er fremstillet af træ. Men i øvrigt er 1 1/2 år en ganske rimelig energimæssig tilbagebetalingstid. Dette fremgår af tabel 5.5, der sammenligner energiøkonomien ved forskellige energianlæg. Tabellen er lavet på grundlag af oplysninger i referencerne (Elbek, 1979; Lawaetz, 1979; Bason, 1980). Der er i alle eksemplerne regnet med at anlæggene fungerer, som de skal hele tiden.

Energianlæg	Energimæssig Tilbagebetalingstid (år)
Kernekraftværk	2-3
Lille Vindmølle	1-2
Stor Vindmølle (Nibe)	~ 1
Lille Solfanger	3-4
Stor Solfanger	6-7
Termorude	0,8

Tabel 5.5 Energiøkonomi for forskellige energianlæg.

3. Miljømæssige forhold

I lighed med enhver anden måde at fremstille energi på, vil en vindmølle kunne påvirke omgivelserne i en vis udstrækning.

Bortset fra de rent æstetiske påvirkninger - der er meget delte meninger om de er positive eller negative - er der mulighed for økologiske forstyrrelser, men også for en vis risiko for mennesker. Med hensyn til økologiske forstyrrelser tænkes dels på sådan noget som arealkrav, mulighed for

skader på fugle og endelig på støjgener, men for alle disse tings vedkommende, synes der ikke at være tale om alvorlige problemer.

For så vidt angår risiko for mennesker vil en sådan forekomme på flere forskellige måder. Under forarbejdning af basismaterialerne (beton, stål, glasfiber etc.) såvel som under konstruktion af de enkelte mølled dele og under rejsning af møllen, vil der kunne ske arbejdsulykker, ulykker der er af helt samme natur, som dem der finder sted under konstruktion og rejsning af f.eks. højspændingsmaster. Når møllen er installeret vil der endelig også være en vis risiko for havari, f.eks. kan der ske det, at en vinge falder af under drift og forårsager skade på levende væsener eller bygninger. Medens sandsynligheden for ulykker af den første slags er særdeles velkendt, er der kun en meget begrænset viden om ulykker af den sidste slags. Der foregår for tiden undersøgelser, både her og i udlandet, der skal klarlægge disse forhold noget bedre. Det synes dog nogenlunde sikkert, at den samlede ulykkesrisiko ved fremstilling af 1 kWh elektrisk energi er af samme størrelsesorden for vindmøller og sædvanlige kraftværker. Men det er endnu for tidligt at fremkomme med mere præcise talangivelser, dertil er usikkerheden og uenigheden simpelthen for stor (Science, 1979).

Det taler dog meget til vindmøllers (og de fleste vedvarende energianlægs) fordel, at de ulykker, der kan forekomme, kun kan have et lokalt omfang. I øvrigt vil de være af en natur, som de fleste mennesker er fortrolige med og kan overskue. Energiproduktion ved hjælp af vindmøller giver heller ikke anledning til dannelse af nogen form for giftige affaldsprodukter.

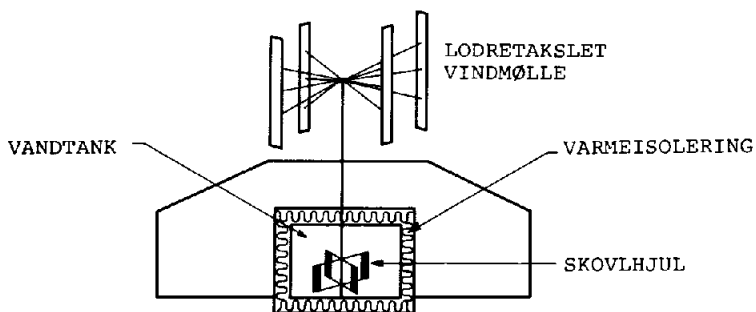
Store øvelser

På de følgende sider er der givet oplæg til 3 store øvelser. Oplæggene er forholdsvis detaljerede, og man kan nøjes med at følge disse oplæg. Hvis der er tid og energi, og især hvis der er adgang til en lille computer (eventuelt en programmerbar lommeregner), vil det dog være nærliggende at udvide beregningerne eller gentage dem med andre forudsætninger end dem, der er angivet i oplæggene. Alle 3 øvelser er formentlig velegnede til gruppearbejde.

I. Vindmølle med vandbremse

Formål

I denne store øvelse ser vi på et hus, der er udstyret med en vindmølle med vandbremse. Huset er illustreret på figur I.1. Vi tænker os, at huset er konstrueret således, at en væsentlig del af husets energibehov skal kunne dækkes af vindmøllen. Vi vil undersøge i hvor høj grad, man kan dække husets opvarmningsbehov alene ved hjælp af vindmøllen



Figur I.1 Hus, der delvis opvarmes af vindmølle med vandbremse.

1. Husets energibalance

Vi betragter huset som vores fysiske system. For at simplificere regningerne antager vi, at huset udelukkende består af vandtanken og af luften inde i huset.

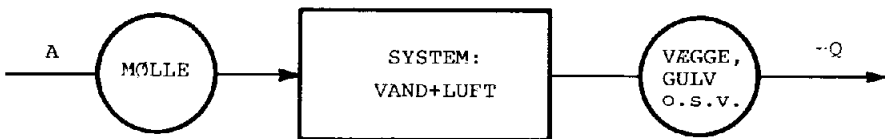
Systemets energi E_{system} er derfor givet som summen af energien E_{vand} af vandtanken og energien E_{luft} af luften i huset. Af varmeteoriens 1. hovedsætning følger det, at

$$\Delta E_{\text{system}} = \Delta E_{\text{vand}} + \Delta E_{\text{luft}} \quad (1)$$

$$= A + Q$$

hvor Q er den varmemængde, der tilføres huset fra omgivelserne, og A er det makroskopiske arbejde, omgivelserne udfører på huset.

Det makroskopiske arbejde udføres af vinden via møllen. Varmemængden Q er i hvert fald om vinteren negativ, da der her er tale om varmetab fra huset til omgivelserne. Energifbalancen kan symboliseres ved følgende figur.

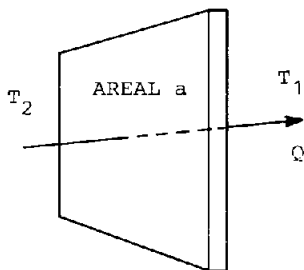


Figur II.2 Energistrømme til og fra det fysiske system, der består af vandtanken + luften i huset.

I det følgende vil vi beskrive, hvorledes de forskellige led i energiligningen kan udregnes. Det vil sætte os i stand til at beregne temperaturudviklingen i huset, hvis vi går ud fra, at det udelukkende opvarmes af vindmøllen.

2. Husets varmetab

Det viser sig, at varmetabet gennem en skillevæg (f.eks. en mur, et vindue, et loft, et gulv) er proportionalt med temperaturforskellen mellem de to sider af skillevæggen. Varmetransporten er selvfølgelig også proportional med skillevæggens areal og med den tid, hvori varmetransporten finder sted.



Figur I.3 Varmetransport gennem væg.

Vi ser på en væg med arealet a . Temperaturen på de to sider af væggen er henholdsvis T_1 og T_2 . Varmetransporten gennem væggen i løbet af tidsrummet Δt kan da skrives på formen

$$Q = k \cdot a \cdot \Delta t \cdot (T_2 - T_1)$$

Størrelsen k kaldes væggenes k-værdi. En skillevægs k -værdi afhænger af væggenes materiale og af dens tykkelse. Gode varmeisolatorer har små k -værdier, og dårlige varmeisolatorer har store k -værdier. SI-enheden for k -værdi er

$$[k] = \frac{W}{m^2 \text{grad}}$$

Lav en beregning af husets varmetab K pr. sekund pr. grads-forskel mellem inde og ude. Benyt oplysningerne i nedenstående tabel I.1 over de forskellige bygningskomponenters k-værdier og arealer.

Hvis temperaturen inde i huset er T , og temperaturen ude er T_{ude} , vil varmetabet $-Q$ i løbet af tidsrummet Δt være givet ved

$$-Q = K \cdot \Delta t \cdot (T - T_{\text{ude}}) \quad (2)$$

3. Møllens arbejde A

Møllens effektivitet C_p er givet ved

$$C_p = \frac{P_m}{P_o}$$

Her er P_m møllens effekt, og P_o er vindens effekt i et vindrør med tværsnitsareal lig med rotorarealet A_m :

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^3 \cdot A_m$$

hvor v_f er den frie vindhastighed, og ρ er luftens densitet.

Møllens arbejde A i løbet af tidsrummet Δt er da givet ved

$$A = C_P \cdot P_O \cdot \Delta t \quad (3)$$

4. Vandets energiændring ΔE_{vand}

Hvis vandets masse er m_{vand} , og vands specifikke varmekapacitet er c_{vand} , vil vandets energiændring ved en temperaturændring på ΔT være givet ved

$$\Delta E_{\text{vand}} = m_{\text{vand}} \cdot c_{\text{vand}} \cdot \Delta T \quad (4)$$

5. Luftens energiændring ΔE_{luft}

Hvis luftens temperatur i huset ændres med størrelsen ΔT vil luftens energiændring ΔE_{luft} være givet ved

$$\Delta E_{\text{luft}} = c_{\text{luft}} \cdot m_{\text{luft}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Størrelsen c_{luft} er luftens varmekapacitet, og m_{luft} er massen af luften i huset.

6. Beregning af temperaturændringen i huset

Ved hjælp af energiligningen og oplysningerne i den efterfølgende tabel I.1 er vi nu i stand til at følge temperaturudviklingen i huset under forskellige vejrforhold.

Kombinerer vi ligningerne (1-5), får vi følgende udtryk for temperaturændringen ΔT i løbet af tidsrummet Δt :

$$\Delta T = \frac{C_p \cdot P_o \cdot \Delta t - K \cdot \Delta t \cdot (T - T_{ude})}{m_{vand} \cdot c_{vand} + m_{luft} \cdot c_{luft}} \quad (6)$$

Se for eksempel på en dag, hvor vindhastigheden er $v_f = 10$ m/s, og udetemperaturen er $T_{ude} = 15^\circ\text{C}$.

Vælg $\Delta t = 1$ time og beregn ved hjælp af energiligningen (6) temperaturændringen ΔT i løbet af en time, hvis husets begyndelsestemperatur er $T = 20^\circ\text{C}$.

Brug sluttemperaturen fra den foregående beregning som begyndelsestemperatur i en ny beregning af temperaturændringen i huset i løbet af den følgende time.

Dette kan gentages nogle gange.

Prøv eventuelt at variere vejrforholdene og begyndelsestemperaturen i huset.

Hvis der er tid til overs, kan man tage fat på følgende problemer:

- a) Overvej hvor I har snydt i beregningerne.
Tror I, fejlene er alvorlige?
- b) I virkeligheden er varmetabet større end det, vi har brugt i beregningerne. Vi har set helt bort fra, at der naturligvis må tilføres frisk luft til huset. For at gøre varmetabet ved ventilationen så lille som muligt, har huset mekanisk ventilation med varmegenvinding.
Find ud af, hvor meget varmetab ved ventilation betyder. (Benyt oplysningerne, der er givet i bilaget "Tekniske Data for Hus og Mølle").

- c) Vi har også set bort fra, at huset faktisk får dækket en ikke ubetydelig del af varmetabet ved hjælp af gratisvarme. Gratisvarme er en teknisk betegnelse for så forskellige ting som solindfald gennem vinduerne, varmeafgivelse fra de personer, der opholder sig i huset og "spildvarme" fra diverse elektriske artikler (køleskab, elkomfur, belysning o.s.v.).

I en gennemsnitshusholdning afgives per døgn ca. 1.5 kWh fra køleskabet, 2.6 kWh fra elkomfuret, 1.8 kWh fra belysningen og desuden ca. 2 kWh fra hver person, der konstant befinder sig i huset (Nørgård, 1979). Hvis der gennemsnitligt befinder sig 3 personer i huset hele tiden, hvor meget bidrager gratisvarmen fra ovennævnte kilder så til at dække husets varmeforbrug i den undersøgte periode (Der ses bort fra solindfaldet gennem vinduerne)?

BILAGTekniske data for hus og mølle

Skillevæg	Areal (m ²)	k-værdi (W/m ² · °C)
Lofter	120	0,14
Ydervægge	350	0,17
Gulve	120	0,19
Vinduer m/3 lag glas	11	1,80

Tabel I.1 k-værdier og arealerMekanisk ventilation med varmegenvinding:

180 m³ luft i timen svarende til et luftskifte på 0,5 gange per time.

Varmegenvindingsgrad: 60%.

Møllen: Rotorareal 25 m²
 Vandtank 4 m³
 Effektivitet 30%

II. Mølle med og uden lager

Formål

Denne øvelse skulle givet et godt indtryk af, hvorledes et perfekt fungerende energilager kan forbedre kvaliteten af elproduktionen fra en vindmølle.

Hovedformålet med øvelsen er at sammenligne den elektriske effekt, en bestemt mølle kan aflevere til det elektriske net, når den er uden lager, og når den er med lager.

1. Indledning

Ved Risø har man siden 1958 foretaget omfattende meteorologiske målinger og bl.a. er vindhastigheden målt 1 gang i timen i 7, 23, 39, 56, 96 og 123 meters højde over jordoverfladen. De publicerede vindhastigheder er i virkeligheden 10-minutters middelværdier, hvilket er en stor fordel, da meget kortvarige fluktuationer herved er midlet ud.

Tabel II.1 angiver hyppigheden q af forskellige vindhastighedsintervaller observeret i året 1962 i 56 meters højde på Risø:

Vindhastigheds- interval (m/s)	Hyppighed (%)	Gedsermøllens C_p -Værdi
0-1	1.1	0
1-2	3.4	0
2-3	7.4	0
3-4	10.0	0
4-5	10.2	0
5-6	11.6	0
6-7	11.6	0.34
7-8	9.7	0.45
8-9	9.9	0.48
9-10	7.4	0.48
10-11	6.2	0.39
11-12	4.3	0.35
12-13	2.8	0.30
13-14	1.6	0.26
14-15	1.0	0.22
15-16	0.7	0.19
16-17	0.4	0.16
17-18	0.4	0.14
18-19	0.2	0.12
19-20	0.1	0.11
> 20	0.0	0

Tabel II.1. Risø vejrdata og Gedsermøllens C_p -værdi.

I højden 56 meter tænkes anbragt en "Gedsermølle" (se kapitel 1). Denne mølle var en nettilsluttet hurtigløber med data, som angivet i Tabel II.2.

Radius:	12 meter
Overstrøget areal:	450 m ²
Vingespids hastighed:	38 m/s
Generatoreffekt:	200 kW
C_p -koefficient:	se tabel II.1

Tabel II.2. Data for Gedsermøllen.

Beregn følgende størrelser:

- a) Middelværdien af vindhastigheden.
- b) Middelværdien af vindens effekt per m^2 .
- c) Middelværdien af møllens effekt per m^2 .
- d) Middelværdien af møllens totale effekt og sammenlign med generatoreffekter.

2. Mølle uden lager

I dagene 1.1.1962 til 6.1.1962 målttes i denne højde vindhastigheder, som opgivet i tabel II.2. For at lette de følgende regninger sættes vindhastigheden lig med en konstant i hele den time, der følger efter måletidspunktet. Således sættes vindhastigheden til at være 3.5 m/s i tidsrummet fra kl. 0 til 1 den 1.1.1962 o.s.v., o.s.v.

Beregn time for time den eleffekt som "Gedsermøllen" kunne have leveret til elnettet. Vis resultatet i et histogram og angiv, hvor stor en del af tiden møllen ville være i drift.

3. Mølle med lager

Vi forestiller os i det følgende, at møllen er tilsluttet et elektricitetsnet, hvor effektbehovet er af nogenlunde samme størrelse som møllens middeleffekt. I denne situation er den meget ujævne elproduktion, der illustreres af histogrammet fra afsnit 2, naturligvis uhensigtsmæssig. Elektricitetsnettet må i visse perioder have sin energi fra anden

side - f.eks. fra et kul- eller oliefyret kraftværk - og i andre perioder er der overskudsproduktion. Problemet er endda endnu større end illustreret ved histogrammet fra afsnit 2, hvor vi jo helt har set bort fra de variationer i vindens hastighed, der forekommer inden for tidsintervaller på 1 time. Det vil derfor være en stor fordel, hvis vi er i stand til at lagre overskudsproduktionen fra de mere vindrige perioder til perioder, hvor det ikke blæser så meget.

Vi udstyrer derfor møllen med et energilager og tænker os at køre systemet bestående af mølle + lager på følgende måde:

- i) Hvis møllen producerer en effekt, der er større end middeleffekten, og hvis lageret ikke allerede er fyldt op, da sendes kun en effekt lig med middeleffekten ud i nettet, og resten går til lageret. Kun hvis lageret allerede er fyldt op sendes hele elproduktionen ud i nettet.
- ii) Hvis møllen står stille eller kun producerer en effekt, der er mindre end middeleffekten, trækkes der energi ud af lageret, således at en effekt lig med middeleffekten stadig kan afleveres til nettet. Hvis lageret er tomt går den afleverede effekt naturligvis ned.

Man skal nu prøve at analysere de samme 6 dage i januar 1962 under den forudsætning, at møllen er udstyret med et 3-timers lager. Et 3-timers lager kan maksimalt rumme den energimængde, som møllen i middel producerer i løbet af 3 timer.

Det forudsættes, at lageret er tomt på starttidspunktet, at der ikke tabes energi ved energioverførsel til og fra lageret, og at der heller ikke tabes energi fra selve lageret.

Vis på et histogram, hvordan den til nettet afleverede effekt varierer time for time.

Hvor stor en del af tiden vil møllen kunne levere strøm under de forudsætninger, der er nævnt ovenfor?

Erstat eventuelt 3-timers lageret med et 24-timers lager og gentag beregningerne.

4. Blyakkumulatorer som energilager

Hvis man gennemfører regninger af ovenstående type over lange tidsrum (1 år eller mere), og hvis man også tager hensyn til at der i praksis altid vil tabes noget energi i lagringsprocessen, kommer man til det resultat, at en enkelt mølle skal suppleres med ca. 500 timers energilager for at være lige så pålidelig som en sædvanlig kraftværksenhed baseret på kul eller olie (ATV, 1977).

En blyakkumulator kan rumme en energimængde på ca. $\frac{1}{40}$ kWh pr. kg og koster omkring 400 kr. pr lagret kWh i rene lagerudgifter. Hvad er da vægten af de nødvendige blyakkumulatorer til at etablere et 3 timers (henholdsvis et 500 timers) energilager for Gedsermøllen, og hvor meget vil det koste? For at sætte dette beløb i relief kan anføres, at det i (ATV, 1977) anslås, at en serieproduceret Gedsermølle (uden lager) i dag vil kunne bygges for ca. 1 million kr.

I kapitel 1 afsnit 4 er givet en meget kort omtale af nogle alternative muligheder for at lagre store energimængder.

MØLLE MED OG UDEN LAGER

Dato	kl.0 kl.1												
1.1.62	3.5	3.0	1.5	5.5	4.5	3.0	9.5	15.5	17.0	13.0	14.0	13.0	
	kl.23												
	12.5	13.5	13.0	13.0	12.0	11.0	11.0	9.0	10.0	8.5	9.5	7.5	
2.1.62	8.5	8.5	8.0	8.5	7.5	8.5	7.5	7.0	5.5	5.5	6.5	5.0	
	4.5	5.5	5.0	7.0	5.5	7.0	6.0	7.0	7.5	6.5	7.0	6.5	
3.1.62	6.5	7.5	6.5	8.0	6.5	4.5	5.5	5.5	4.5	4.5	3.0	4.0	
	2.5	3.5	2.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
4.1.62	4.0	4.5	5.5	5.5	7.5	6.0	5.0	5.0	5.0	7.0	4.5	7.0	
	5.5	6.0	6.5	6.5	6.5	8.0	7.5	8.5	6.0	5.5	7.0	7.0	
5.1.62	6.5	5.5	4.5	4.5	5.5	6.0	6.5	6.5	8.0	7.5	8.5	8.0	
	8.5	8.5	10.0	10.0	10.5	13.5	12.5	14.0	12.5	12.5	13.0	12.5	
6.1.62	12.0	11.5	12.0	12.5	11.0	11.0	10.5	11.0	9.5	8.5	6.5	7.5	
	8.5	10.5	11.0	10.5	10.5	9.5	11.0	12.0	11.5	12.0	9.0	9.5	

Tabel II.2 Vindhastigheder i meter pr. sek. målt på Risø
i 56 meters højde.

III. Forskellige energiresourcer

Formål

Udgangspunktet for denne øvelse er en række opgaver, hvor man skal vurdere omfanget af nogle af de vedvarende energiformer, der er til vores rådighed.

Formålet med øvelsen er dels at foretage en indbyrdes sammenligning af størrelsen af de forskellige energiformer, og dels at se disse størrelser i forhold til Danmarks energiforbrug. Undervejs kan man eventuelt overveje, om det er rimeligt at antage, at det vil kunne svare sig at udnytte de nævnte energiformer.

1. Danmarks energiforbrug

En gennemsnitsdanskers effektforbrug er ca. 5 kW.

Beregn Danmarks årlige energiforbrug (i Joule og kWh).

2. Vindenergi

Antag at en vindmølle med rotorradius på 25 m er anbragt på en lokalitet, hvor vindhastigheden varierer som ved Tranebjerg (se øvelse 4.1).

- a) Beregn middelværdien af vindhastigheden.
- b) Beregn middelværdien af vindeffekten per m^2 .
- c) Beregn møllens årlige energiproduktion, idet det forudsættes, at møllen udnytter 25% af vindens energi på årsbasis.

Antag at der bygges én af disse møller per km^2 i Danmark, og antag, at vindforholdene overalt er som ved Tranebjerg.

- d) Beregn den årlige energiproduktion fra disse møller.
- e) Beskriv kvalitativt energiproduktionen som funktion af tiden.

3. Solindstrålingen

Den solenergi, der pr. sek. passerer gennem 1 m^2 vinkelret på solstrålerne uden for atmosfæren betegnes solarkonstanten S. Den er ved hjælp af satellitter målt til at være

$$S = 1,353 \text{ kW/m}^2$$

- a) Beregn den solenergi, der årligt træffer de yderste lag af jordens atmosfære.
- b) Cirka halvdelen af denne solenergi når gennem atmosfæren ned til jordoverfladen.
Beregn den gennemsnitlige årlige solindstråling per m^2 af jordens overflade.

- c) Da Danmark ligger på ca. 56° nordlig bredde vil det gennemsnitlige solindfald pr. m^2 for Danmark være mindre end for jorden som helhed.
Vurdér det totale solindfald på Danmark i løbet af et år.
- d) Skaf oplysninger om, hvorledes dette solindfald fordeles sig over årets måneder, og kommenter hvad dette betyder for udnyttelsen af solenergi i Danmark.

4. Bølgeenergi

Ved Jyllands vestkyst er den gennemsnitlige bølgeeffekt per m bølgefront ca. 10 kW.

- a) Beregn den bølgeenergi, der per år passerer en linie parallel med Vestkysten.

5. Energiskov

Ved fotosyntese omsættes solenergi til koncentreret kemisk energi i planter. Effektiviteten i denne omsætning er forholdsvis lav. På årsbasis vil kun 0.1-1% af den solenergi, der træffer en plante, blive oplagret som kemisk energi i planten. Der er dog betydelige variationer fra plante til plante.

Antag, at hele Danmarks areal dækkes af en hurtigvoksende energiskov med fotosyntese-effektivitet på 0.9% på års-

basis. (Svenske forsøg tyder på, at man kan opnå en sådan effektivitet).

- a) Beregn skovens energiproduktion på ét år.
- b) Angiv nogle af de problemer, som er forbundet med at dække en betydelig del af Danmark med energiskov.

6. Biomasse Affald

Under danske forhold vil det især være udnyttelsen af land- og skovbrugets affaldsprodukter, der er interessante. De oplagte muligheder er affaldstræ fra skove og læbælter, overskudshalm samt staldgødning. I en ny rapport (Tovgård Pedersen, 1979) er der dels angivet overslag over de mængder, det drejer sig om, og dels overslag over energiindhold (se nedenstående tabel).

- a) Hvor stort er det samlede energipotential i disse affaldsprodukter?
- b) Nævn nogle af de problemer, der vil være forbundet med at udnytte affaldsprodukterne fuldt ud.

	Mængde [10 ⁶ tons/år]	Tørstofindhold [%]	Energiindhold [kWh/kg tørstof]
Affaldstræ	1.0	55	5.5
Overskudshalm	2.0	85	5.0
Staldgødning	35	25	5.0

Tabel III.1 Mængde og Energiindhold i Danmarks biomasse affald.

Litteraturliste

Referencer, der er mærket med (*), er velegnede som supplerende læsning om vindenergi og/eller vindmøller.

- (*) ATV Arbejdsgruppe (1977): "Vindkraft i Elsystemet", Polyteknisk Forlag
- Bason F. og Nielsen H. (1980): "Solenergi og Solvarmeanlæg", Udkommer på Fysik- og Kemilærerforeningens Forlag.
- Boligministeriet (1979): "Redegørelse for Bygningers Varmeforbrug", Boligministeriet.
- (*) Bugge, J.Chr. (1978): "Bogen om Vindmøller", Clausen bøger
- Danske Vindkraftværker (1979), Naturlig Energi 2. Årgang, November 1979, side 16
- Elbek, B. (1974): "Energi, Energi, Energikrise", Munksgård, side 50
- Elbek, B. (1979): "Energianalyse af Energisystemer", VVS-bladet, nr. 9, side 29
- Frydendahl, K. (1971): "Danmarks Klima, I Vind", Meteorologisk Institut
- (*) Herforth, C. og Nybroe, C. (1976): "Sol-Vind", Informations Forlag
- Jensen, J. (1980): "Transportsektorens Problem-Energilagring", GAMMA 42, side 3
- Jensen, M. (1954): "Læ-Effekter", Disputats ved Dth
- Johansson, M. (1974): "Udnyttelsen af Vindkraften til Elproduktion", Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling (DEFU)

- Lawaetz, H. og Furbo, S. (1979): "Energiforbrug til Fremstilling af Solvarmeanlæg", Laboratoriet for Varmeisolering (Dth), Meddelelse nr. 87
- Lura, E. (1977): "Alternative Energikilder", Politikens Forlag
- (*) Maribo Pedersen, B. (1980): "Vindenergi", i Symposium over Danmarks Energiproblemer 1979, Samfundsvidenskabeligt Institut
- Nørgård, J.S. (1979): "Husholdninger og Energi", Polyteknisk Forlag
- Science (1979): Se for eksempel artiklerne i Vol.203 side 718 og Vol.204 side 454 og 564
- (*) Sørensen, B. (1977): "Danmarks Vedvarende Energikilder", OOA og OVE
- Sørensen, B. (1980): "A Combined Wind and Hydropower System", Niels Bohr Instituttet
- (*) Sødergård, B. (1975): "Vindkraftbogen", Teknisk Forlag
- Tovgård Petersen, T. (1980): "Energi fra Biomasse", i Symposium over Danmarks Energiproblemer 1979, Samfundsvidenskabeligt Institut

FORKORTELSER FOR POTENSER AF 10

P(peta)= 10^{15}	m(milli)= 10^{-3}
T(tera)= 10^{12}	μ (mikro)= 10^{-6}
G(giga)= 10^9	n(nano)= 10^{-9}
M(mega)= 10^6	p(piko)= 10^{-12}
k(kilo)= 10^3	f(femto)= 10^{-15}

OMREGNINGSTABEL FOR ENERGIMÆNGDER

	Joule	kWh	TWyr	Mtoe
1 joule	1	$2,78 \times 10^{-7}$	$3,17 \times 10^{-20}$	$2,40 \times 10^{-17}$
1 kWh(kilowatttime)	$3,60 \times 10^6$	1	$1,14 \times 10^{-13}$	$8,60 \times 10^{-11}$
1 TWyr(Terawattår)	$3,15 \times 10^{19}$	$8,75 \times 10^{12}$	1	753
1 Mtoe(Million tons olie)	$4,18 \times 10^{16}$	$1,16 \times 10^{10}$	$1,33 \times 10^{-2}$	1
1 kg stenkul indeholder	$2,9 \times 10^7$	8,2	$9,3 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-10}$
1 m ³ naturgas indeholder	$3,5 \times 10^7$	9,8	$11,1 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-10}$
1 kg råolie indeholder	$4,2 \times 10^7$	11,6	$13,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-9}$
1 tønne råolie* indeholder	$5,7 \times 10^9$	1600	$18,2 \times 10^{-11}$	$1,4 \times 10^{-7}$
1 kg U ²³⁵ indeholder	$8,2 \times 10^{13}$	$2,3 \times 10^7$	$2,6 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-3}$

(*) 1 tønne = 159 liter

Eksempler:

1 kWh = 1 kW i 1 time

= 1000 Watt i 3600 sek.

= $3,6 \times 10^6$ Joule

1 TWyr = 1 TW i 1 år

= 10^{12} W i (365×24×3600)sek.

= $3,15 \times 10^{19}$ Joule

