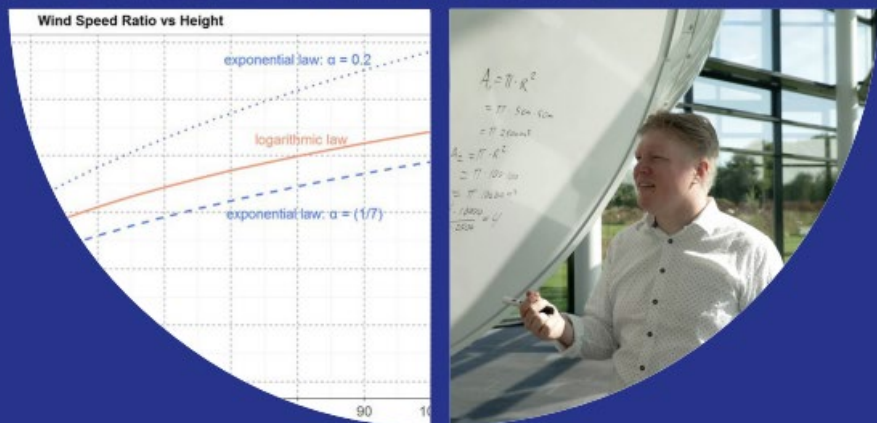


Matematikken bag vindenergi hos Vestas



Vestas

Bjørn Grøn
Per Rosenqvist





Indholdsfortegnelse

0. Indledning	7
1. Udnyttelse af Vindenergi gennem historien	8
1.1 Poul la Cour og den danske vindmølletradition	9
1.2 Sugningsteorien og stødteorien	10
2. Skalering	13
3. Hvor meget energi kan vi høste – Betz lov uden differentialregning .	16
3.1 Udledning af Betz lov	19
Tredjegradspolynomiers symmetriegenskaber	21
4. Vindhastighed, højde og ruhed	23
4.1 Vindmøller, størrelse og effekt	24
4.1.1 Model for vindhastighed	24
4.1.2 Vindhastighed og effekt	28
5. Hvor meget energi kan vi høste - Betz lov med brug af differentialregning	30
5.1 Udledning af Betz lov	32
6. Hvorfor blæser det – hvor blæser det	35
6.1 Opdrift og hvorfor varm luft stiger til vejrs	36
6.1.1 Hvorfor stiger varm luft op?	37
6.2 Det primære vindsystem	38
6.2.1 Ved ækvator	38
6.2.2 Hadley- og Ferrellcellerne	39
6.2.3 Coriolisafbøjning	39
6.2.4 Polarområderne	40
6.3 Hyppigheden af de forskellige vindhastigheder	40
Projektoplæg del 1 om vind og Weibull-fordelingen:	42
6.3.1 Vindhastighed og energi – gennemsnitlig effekt	44
Middelhastigheden	44
Middelværdier for funktioner af den stokastiske variabel	44
Varians og spredning	45
6.3.2 Luftens energi- og effektstrøm	46
Projektoplæg om vind og Weibull-fordelingen	47
7. Hvorfor drejer vingerne rundt – aerodynamik og vingedesign	48
7.1 Kraftmoment og impulsmoment	50
7.2 Rotation om en fast akse - Inertimoment	53
7.3 Kræfter på mølletårnet ved nedbremsning af rotoren	56
7.3.1 Rotationsenergi – hvordan overføres vindens energi til rotationsenergi af vingerne?	57
7.4 Tryk og trykgradientkræfter – hvorfor drejer vingerne rundt?	59
7.4.1 Angrebsvinklen	59
7.4.2 Bernoullis lov	61
Projekt Autentiske data fra vinge i vindtunnel med forskellige angrebsvinkler	63
Numerisk integration af kræfterne på vingen	65
Datasættene	65
Trapezintegration	68
7.5 Aerodynamik og vingedesign	72
7.5.1 Vindhastigheder set fra forskellige koordinatsystemer – Galileitransformationen	72

8. Elektromagnetisme, jævnstrøm, vekselstrøm, og højspænding

8.1 Elektromagnetisme	76
H.C. Ørstedts opdagelse af elektromagnetisme	76
Simulation af Induktion	76
Forslag til eksperimenter	77
Generator	77
Forslag til eksperimenter	78
Transformation kvalitativt	78
8.2 Magnetisk Flux og Faradays Induktionslov	79
8.2.1 Magnetisk Flux (Φ_B)	79
8.2.2 Faradays Induktionslov	80
8.3 Transformatorer og transformation	81
8.3.1 Hvordan bestemmer vi spændingerne?	81
8.3.2 Hvordan bestemmer vi strømmen?	82
8.4 Jævnstrøm og vekselstrøm, almindelig og højspænding	83
8.4.1 Effekten i vekselstrøm	83
Modellering af vekselstrøm og beregning af effekt	83
Strøm i hjemmet	85
Gennemsnit virker ikke	85
RMS spænding	85
8.4.2 Hvordan genererer strømmens to faser	85
8.4.3 Hvordan genererer strømmens tre faser	86
8.4.4 Transformer af vekselstrøm	86
Anvendelse af transformere	87
Effekt og energitab	87
8.4.5 Energital og transmission	87
9. Priser og data	89
10. Støj fra vindmøller	92
10.1 Lydintensitet og lydstyrke	93
10.1.1 Decibelskalaen – Hvorfor bruger vi den?	93
10.2 Afstandskvadratloven	95
10.2.1 Afstandskvadratloven – en fysisk antagelse	95
Eksperiment: Afstandskvadratloven for lydstyrke?	96
Eksperiment Afstandskvadratloven for lyd igen – også selvom du ikke har lavet forsøget	98
10.2.2 Addition af støj	98
Projektskitse/SRP: Støj fra vindmølleparker	99





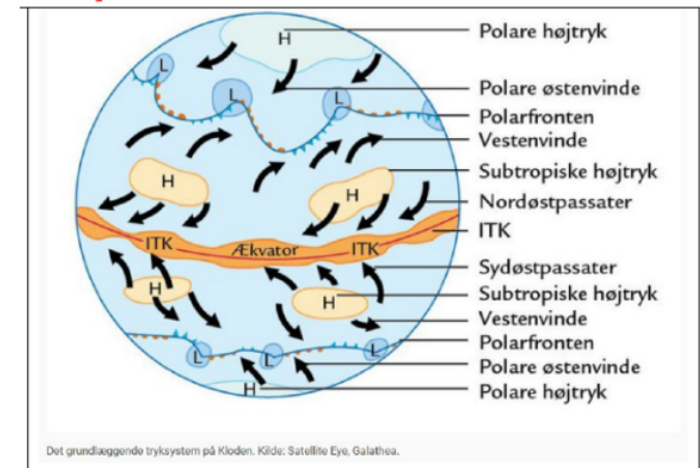
Aktiviteter på indledende niveau

Skalering – kapitel 2 / film: 0-2.25, 3.53-11.47, 15.20-20.11

- Små opgaver, der kan tages ind til perspektivering, fx om %-regning

Symbolhåndtering - afsnit 6.1 om vindsystemer

Trigonometri – afsnit 6.2 om vindsystemer og coriolis



Samlet 6.1 og 6.2 – samarbejde med NG om vindsystemer





B-niveau – funktioner og modeller 1

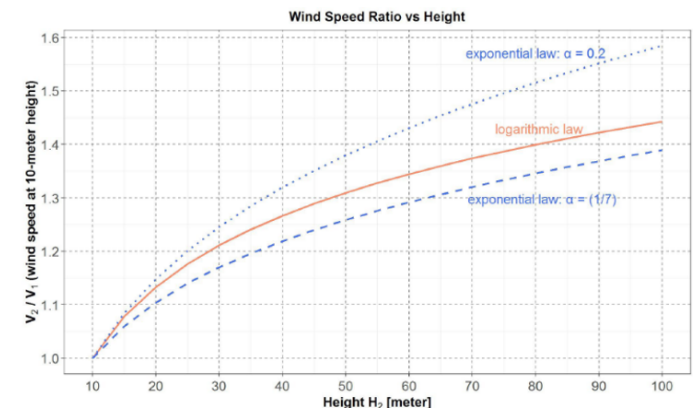
Potensfunktioner og log funktioner

– Hastighed og højde, kap 4/ film 20.15-24.28

- Tolke grafen s 26
- Sammenligne log- og potensmodellerne for forskellige **parameterværdier for ruhed og windshear-coeff.**

– Den logaritmiske lov:
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(h_2 / z_0)}{\ln(h_1 / z_0)}$$

– Potensloven:
$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a$$



- Forstå modellen som potensmodel
- Løse øvelserne, fx hvad er Tanevs model?

Polynomier- kapitel 3 – Betz lov uden diff-regn

- Formlen for hvor meget energi vi kan høste / film 26.45 – 31.27
- Undersøge **tredjegradspolyn** – grafernes symmetri om **vendepunkter**
 - kan give Betz-formel

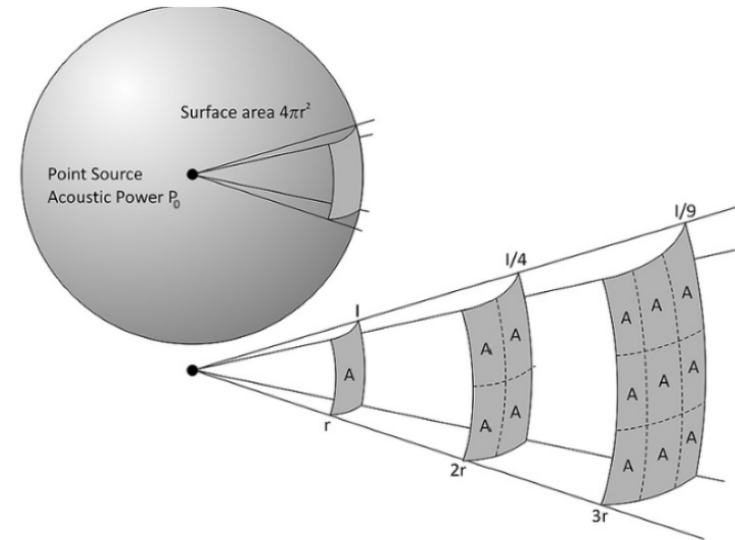




B-niveau – funktioner og modeller 2

Logaritmefunktioner - kapitel 10 om støj

- Lydintensitet og lydstyrke – hvordan måles det
- **decibel**
- **Afstandskvadratloven**
 - for lydintensitet?
 - for lydstyrke?



Støj fra **vindmølleparker** s 99

- Lydkortregneark s. 100
- Addition af støj?



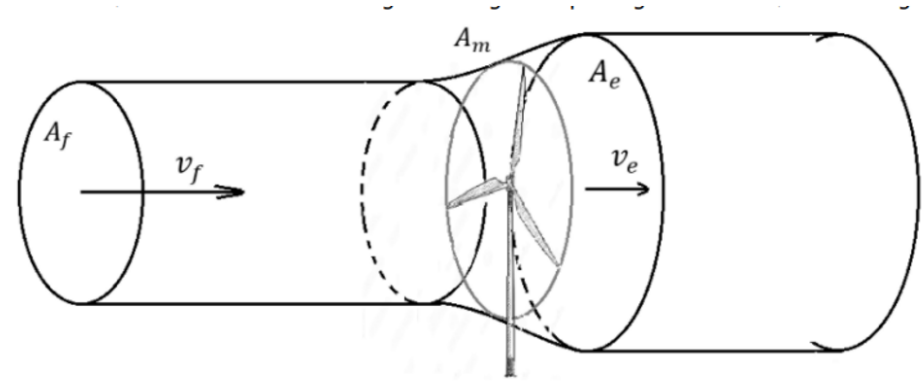


B-niveau – Differentialregning

Hvor meget energi vi kan høste

- Uddledning af **formlen** - kapitel 5 - **film 26.45 – 33.12**

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4} \rho A_m v_f^3 \left(1 + \frac{v_e}{v_f} - \left(\frac{v_e}{v_f} \right)^2 - \left(\frac{v_e}{v_f} \right)^3 \right) \\ &= \frac{1}{4} \rho A_m v_f^3 (1 + x - x^2 - x^3) \end{aligned}$$



- Undersøgelse af **3. gradspolynomier**

Betz lov – et optimeringsproblem

Maks-sted og maks-værdi

Hvad betyder det for hastigheden før og efter møllen





A-niveau – Diff.regn. og Statistik

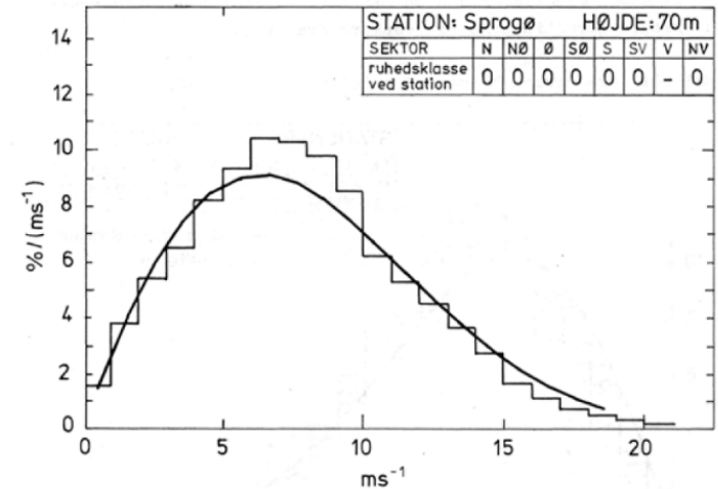
Fordelingsfunktioner og frekvensfunktioner – kap 6

Weibull-fordelingen – frekvens-funktion:

$$f_{A,C}(x) = \frac{C}{A} \cdot \left(\frac{x}{A}\right)^{C-1} e^{-(x/A)^C}$$

Formfaktor C og **Skaleringsfaktor A**

- undersøges eksperimentelt, øv 6.7
- undersøges analytisk, øv 6.8



Differentialregning – øv 6.9

Mest sandsynlige hastighed – maks
(lidt avanceret sammensat differentiation)

Integralregning – øv 6.14, øv 6.15

Middelværdi, varians og spredning

$$Var(X) = E(X^2) - E(X)^2$$

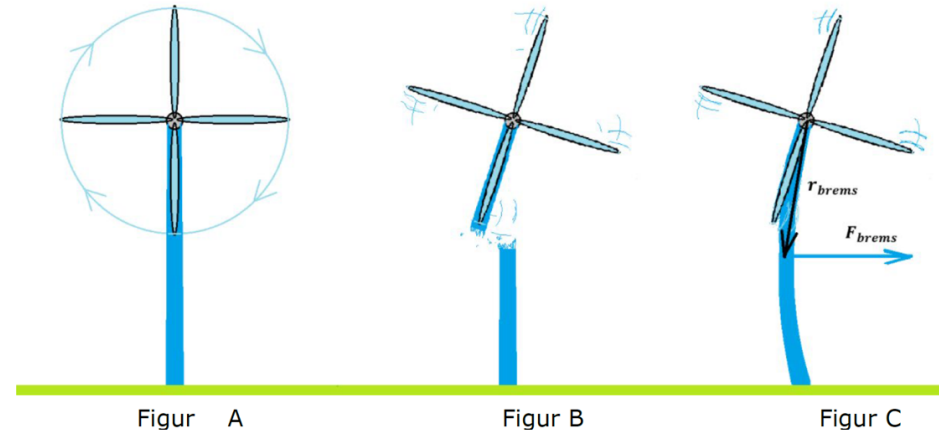




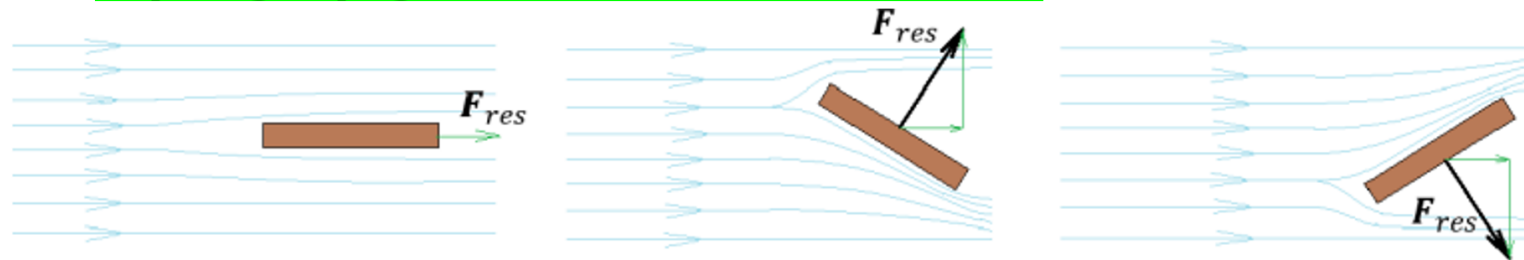
A-niveau – forløb med fysik A - 1

Hvorfor drejer vingerne rundt? – kap 7 s 49-74

- **Vektorer i 3D**, vektorprodukt,
- **Klassisk mekanik** – kraftmoment, impulsmoment, inertimoment
- Kræfter på mølletårnet



- **Tryk og trykgradienter – Bernoullis lov**



Emnerne egner sig godt og givetvis bedst til SRP'er





A-niveau – forløb med fysik A - 2

Elektromagnetisme og induktion kap 8 s 49-74
film 12.16- 13.00, 13.30-15.10

- Virtuelle og evt faktiske eksperimenter – øv 8.1-8.4
- **Differentialligninger** og Faradays induktionslov øv 8.8-8.10

Vekselstrøm og de to eller tre faser

- Gennemsnitlig effekt – **integralregning**
- Transformatorer og energitab

Velegnede emner til srp

