

Vindenergi – en gammel teknologi med nye udfordringer

Uffe V. Poulsen

Institut for Ingeniørvidenskab, Aarhus Universitet

IFA Fysiklærerday 2013

Vindturbinefysik

En gammel teknologi

Den moderne turbine

Turbinens vekselvirkning med luften

Vindfarme og vindskygger

Farme vs. enkelte turbiner

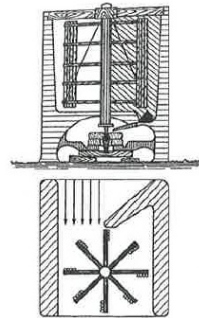
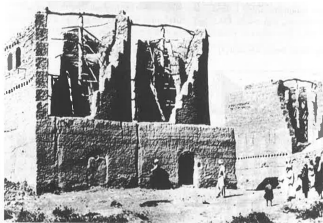
Vindskygge-modeller

Konsekvenser for elsystemet

Lad vejret bestemme!

De første vindmøller

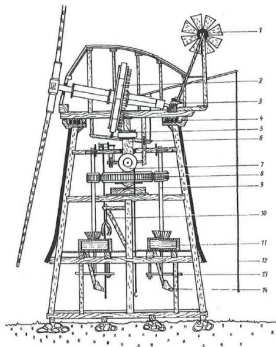
Mellemøstlige *vertikal-akse*
møller så tidligt som 1700 f.kr.!



Kinesiske “flap-sejls-møller”,
cirka 1000 e.kr.

Vindmøller i Europa

Horisontal-akse møller udvikles senere i Europa
(skriftlige kilder 1200 e.kr.)



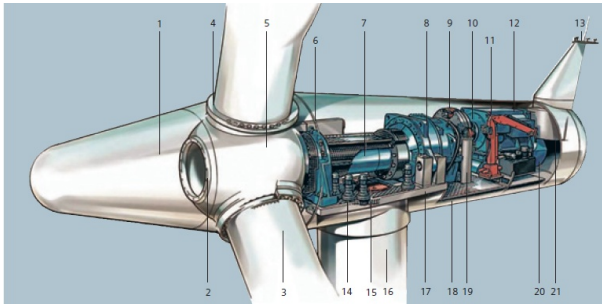
En typisk vindturbine (Siemens SWT-2.3-82 VS)



- vinger:** 40 m lange, 15 ton, glasfiber
- nacelle:** 15 m lang, 80 ton, stål
- tårn:** 80 m højt, 150 ton, stål

Vingerne roterer 18 omgange pr. minut ved 13 m/s og møllen producerer da 2.3 MW

Nacellens indre

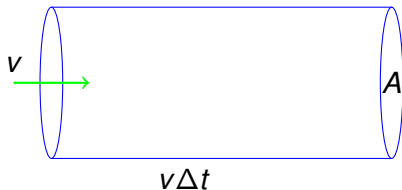


7: lav-hastigheds aksel

8: gearkasse

12: generator

Vindens kinetiske energi



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

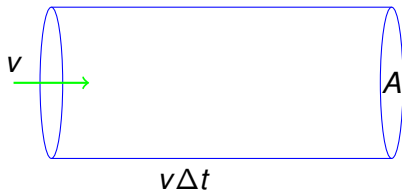


$$\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \Delta m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \Delta t$$

For $v = 10 \text{ m/s}$ og $A = \pi(40\text{m})^2$:

$$\frac{dm}{dt} = 60 \text{ ton/s} \text{ og } P_{\text{kin}} = 3 \text{ MW!}$$

Vindens kinetiske energi



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

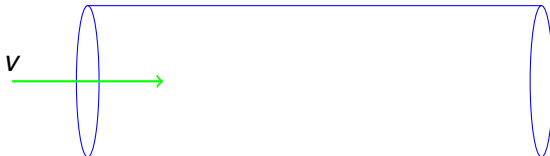
$$\Downarrow$$

$$\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \Delta m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \Delta t$$

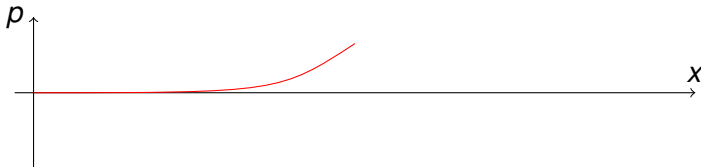
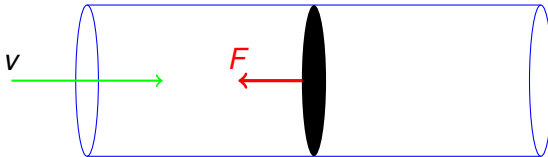
For $v = 13 \text{ m/s}$ og $A = \pi(40\text{m})^2$:

$$\frac{dm}{dt} = 85 \text{ ton/s} \text{ og } P_{\text{kin}} = 6.8 \text{ MW!}$$

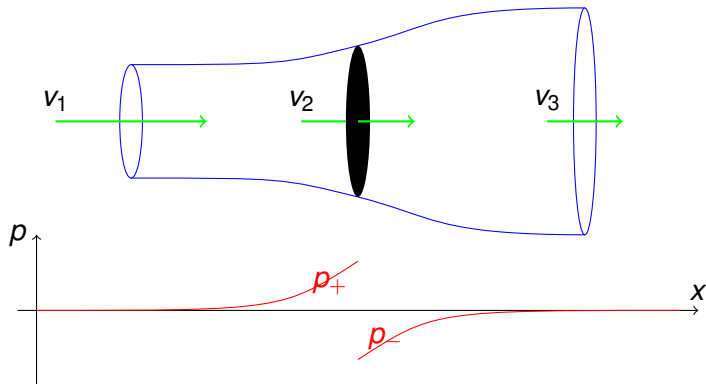
Problemet med grådighed



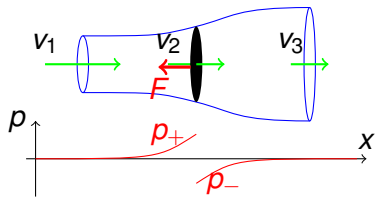
Problemet med grådighed



Problemet med grådighed



Optimal grådighed og Betz-grænsen



Energibevarelse (Bernoulli) fra 1 til 2 og fra 2 til 3:

$$p_+ - p_0 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2)$$

$$p_0 - p_- = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_3^2)$$

Impulsbevarelse fra 1 til 3:

$$F = \frac{dm}{dt} (v_1 - v_3) = \rho A v_2 (v_1 - v_3)$$

Kraftbalance omkring rotor:

$$(p_+ - p_-) A = F$$

Resultat:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$$

$$P = P_{\text{kin}} c_p$$

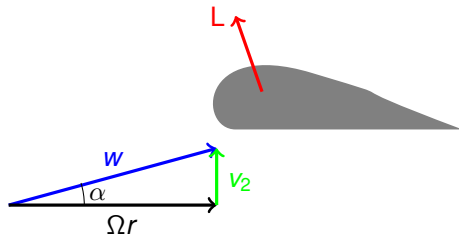
$$c_p = \frac{1 + \frac{v_3}{v_1}}{2} \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right]$$

$$\max c_p = 59\% \quad @ \quad v_3 = \frac{1}{3} v_1$$

Vindmølle-design

Mission: Brems vinden til $v_3 = \frac{1}{3}v_1$ og opsaml al energien

Det gode trick: aerodynamisk lift



$$L = \frac{1}{2} \rho w^2 cb C_L$$

$$\tau = \sin(\alpha) L r$$

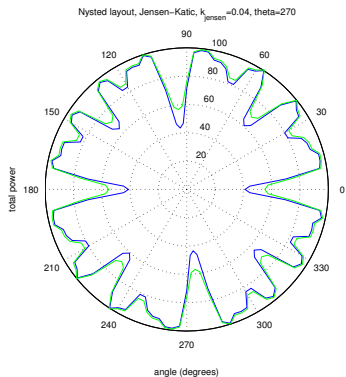
$$P = \tau \Omega$$

Moderne møller:

$\Omega R \sim 10v_1 \rightarrow$ stor w og lille $\tau \rightarrow$ smalle vinger og lille "rotationstab"

Et eklatant symmetribrud...

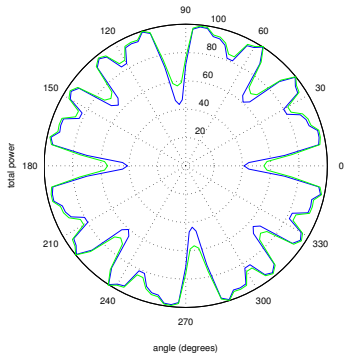
Nysted havvindmøllepark



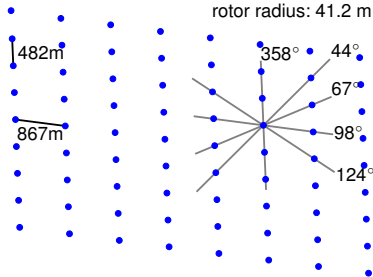
Et eklatant symmetribrud...

Nysted havvindmøllepark

Nysted layout, Jensen-Katic, $k_{\text{Jensen}}=0.04$, $\theta=270$

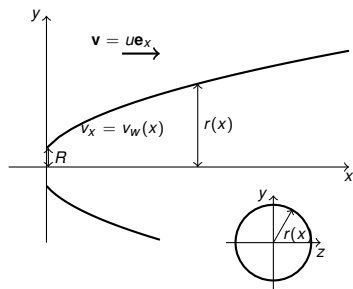


72 turbines, rated power: 2.3 MW
rotor radius: 41.2 m



Vindskygger!

Statistiske, geometriske modeller



Jensen model:

$$r(x) = R + kx$$

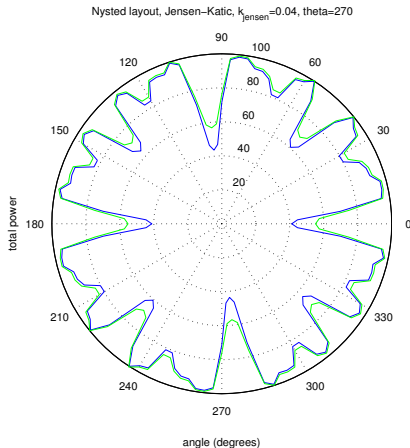
Frandsen model:

$$r(x) = R\sqrt{\alpha x/R}$$

Disse modeller afløses kun langsomt af egentlige simuleringer!

Gode i middel: Kan de også bruges på øjeblikks-billeder?

Hvorfor se på øjebliksbilleder?



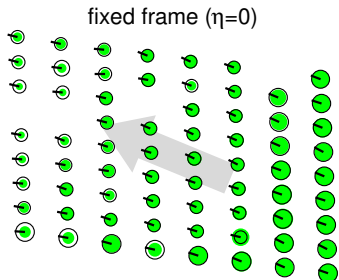
Blå line: selviske møller
Turkis line: uselvviske møller

Teoretisk potentiale (statisk): et par procent ekstra produktion
I praksis virker det dårligt....

Parametrisering af produktionsmønstre ved simple vindskygge-modeller

[UVP, J. Scholz, J. Cleve, E. Hedevang, M. Greiner]

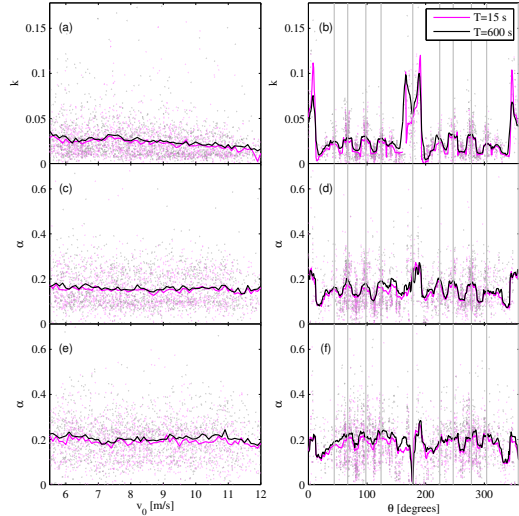
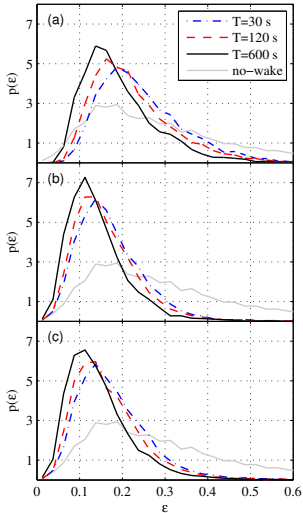
Data: 3 måneders SCADA data fra Nysted, cirka 1 Hz tidsopløsning



Metode:

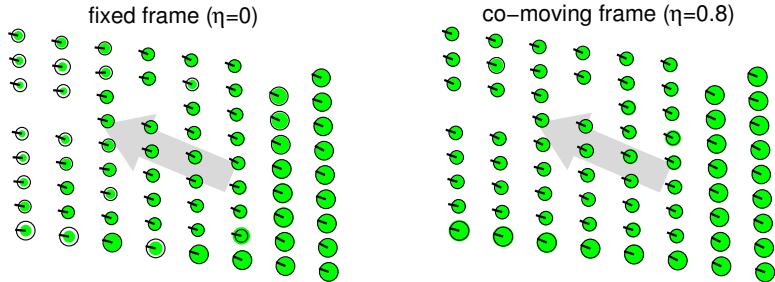
1. kalibrer møllernes krøjningssensor
2. udtræk fri vind fra forreste møller for hver e.g. 30 sekunds periode
3. fit modellen til øjebliksbillederne

Hvor godt virker det?



Kan det forbedres?

Ja, propagerende vindskift kan fanges i “medfølgende” ramme:



Hvordan skal fremtidens elsystem designes?

[R. Rodriguez, G. Andresen, M. Rasmussen, M. Greiner, (UVP)]

Mere el fra fluktuerende kilder

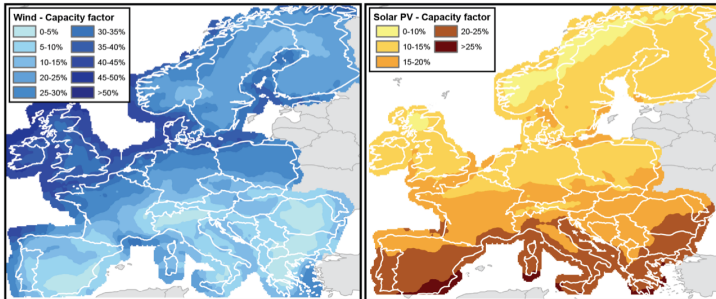
→ nye udfordringer til produktion og transmission!

Aarhus tilgangen er “Lad vejret bestemme!”

- ▶ “fysiske niveau”, i.e. ingen økonomisk model
- ▶ historiske vejrdata + installationsstrategi → fiktive produktionstidsserier for vind og sol
- ▶ + historiske forbrugsdata → fiktiv balancering, lagring og transmission

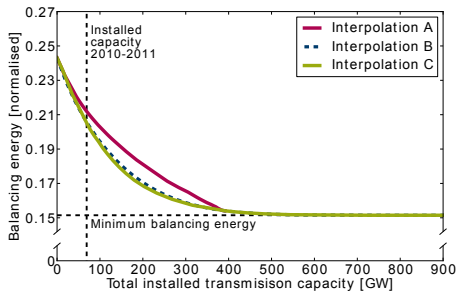
Hvorfor transmission?

Resourcerne er tidsligt (dag-nat!) og rumligt ulige fordelt



Balancing versus transmission

Antagelse: vind og sol producerer i **gennemsnit** præcis nok el



Konklusion: 24% balancering nødvendig uden transmission, 15% ved optimal transmission (cirka 6 gange nuværende)

Tak for opmærksomheden!

Spørgsmål er velkomne (også på uvp@phys.au.dk)