

# De formule Virya

Ruurd van der Meulen

maart 2003

## De formule Virya

### Ten geleide

Bij de Werkgroep Ontwikkelings Technieken (WOT) kwam vanaf eind jaren 80 een toenemende vraag naar, zelf te maken, elektriciteitsopwekkende windmolens. Het antwoord daarop luidde vaak afwijzend, omdat het in elkaar zetten van een molen een erg ingewikkelde aangelegenheid is. Om teleurstellingen te voorkomen adviseerde ze dan ook kant en klaar commercieel verkrijgbare ontwerpen.

Inmiddels staat op het WOT-proefterrein een windgenerator met een vermogen van ongeveer 1 kW met een rotordiameter van 3,3 meter, de Virya 3.3. Deze combineert het verlangen zelf te bouwen en een betrouwbaar ontwerp. Het betreft een concept van het constructiebureau Kragten Design uit St.-Oedenrode, een bedrijf gespecialiseerd in het ontwerpen van kleine windmolens. Om te beoordelen of dit concept aanbevelenswaardig was, hebben we dit vanaf bouwtekeningen zelf gemaakt.

Aanvankelijk hebben we gerekend aan optimalisering van het uitgangsvermogen door middel van een elektronische mutator tussen de generator en accu. Hieruit bleek dat het vermogen niet kan toenemen. Thans kunnen we het oorspronkelijke ontwerp bij onze adviesaanvragers van harte aanbevelen.

De onderstaande uiteenzetting, die in het teken staat van die optimalisering, pretendeert niet volledig te zijn. Maar hopelijk wordt bij een aantal lezers de interesse gewekt, zodat er nóg meer aan elektriciteitsopwekkende molens kan worden gedaan, mogelijk zelfs op het WOT-terrein (er zijn nog generatoren).

Van de gelegenheid maak ik gebruik een aantal mensen te bedanken voor hun bijdrage, hetgeen tot de inzichten heeft geleid. Om te beginnen bij de heer A. Kragten voor de rondleiding op zijn bedrijf en zijn uitleg. Verder Bertus de Jong en Freddy Alferink, voor het werken aan onder meer een elektronische mutator.

Het feit dat hier over de Virya op internet gepubliceerd is betekent dat het overnemen van tekstdelen is toegestaan. Bronvermelding wordt daarbij op prijs gesteld.

Ruurd van der Meulen

### De Virya

De Virya (fig. 1) wekt geen energie op, maar zet dit om. Stromingsenergie van de wind (in feite een afgeleide van zonne-energie en rotatie-energie van de aarde<sup>1</sup>) wordt via mechanische energie getransformeerd naar elektrische energie. Dit gebeurt in resp. de rotor en de generator van de molen. Om dit gehele proces goed te doorgronden moeten we dus op de hoogte zijn van de manier waarop de afzonderlijke deelprocessen functioneren. Van belang zijn daarbij onder andere de wind en de karakteristieken van de rotor en generator. Ook komen aan de orde de toren en de beveiligingen.

---

<sup>1</sup> *Duurzame energie voor ontwikkelingslanden*, Cursusbundel van de Werkgroep Ontwikkelings Technieken, Enschede, 1996



Fig. 1. De Virya.

### De wind

De windsnelheid ( $v$ ) is voor de omgezette energie enorm van belang omdat de energie die in de wind zit evenredig is met  $v^3$ . De kinetische energie neemt kwadratisch toe en de hoeveelheid massa die voorbij komt waaien neemt evenredig met  $v$  toe<sup>2</sup>. Dit wil trouwens niet zeggen dat de output van de molen evenredig is met  $v^3$ ; veel molens (zoals de Virya) weten maar ten dele van dit exponentiele verband te profiteren, vooral bij harde wind.

### De rotor

Deze zet de stromingsenergie in de wind ( $P_{wind}$ ) om in mechanische energie (rotatie-energie= $P_{as}$ ). Het rendement waarmee dit gebeurt heet de vermogenscoëfficiënt of in het engels coefficient of performance ( $C_p$ ). Vaak wordt de rotorkarakteristiek aangegeven met een  $C_p$ - $\lambda$ -kromme. Hierin stelt  $\lambda$  de snellopendheid van de rotor voor; dit is de verhouding tussen de tipsnelheid van de rotor en de windsnelheid. In fig. 2 wordt een voorbeeld van zo'n kromme gegeven zoals die voor de Virya geldt<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> *Duurzame energie voor ontwikkelingslanden*, Cursusbundel van de Werkgroep Ontwikkelings Technieken, Enschede, 1996

<sup>3</sup> A. Kragten, *Explanation for measurements performed on a four poles generator equipped with neodymium magnets*, St.-Oedenrode, 1991

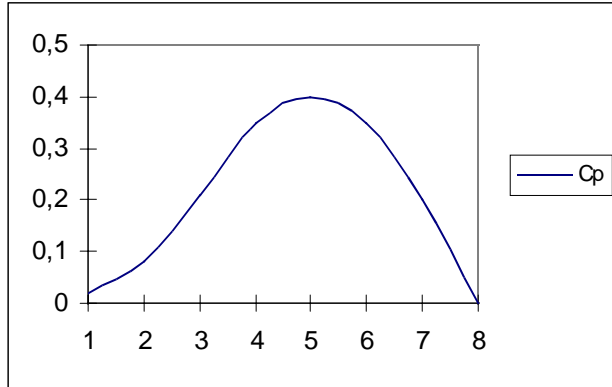


Fig. 2. Vermogenscoëfficiënt als functie van de snellopendheid bij de Virya

De  $C_p$ - $\lambda$ -kromme is onafhankelijk van  $v$  en wordt alleen bepaald door de vorm van de rotor, zolang gerekend wordt met de  $v$ -component loodrecht op de rotor (zie onder het kopje ‘de windvaan’). Daaruit volgt dat het toerental van de rotor ( $n$ ) evenredig met  $v$  moet zijn willen we het maximum aan energie uit de wind onttrekken. Voor de berekeningen is van belang vast te stellen dat het werkgebied van de kromme een kwadratisch verloop heeft (zie onder ‘energieën en rendementen’).

Behalve  $C_p$  bepalen verder de luchtdichtheid ( $\rho$ ), de straal ( $r$ ) en de stand van de rotor ten opzichte van de wind ( $\alpha$ ) (zie fig. 3) de hoeveelheid energie die de rotor oppikt.

De rotor bestaat uit drie geschilderde houten bladen die elk een hoek maken van  $7^\circ$  met het ‘vlak’, zodat er door de wind een aandrijvende kracht (koppel) op ontstaat. Daardoor gaat de rotor draaien. De bladen zijn door middel van een verende constructie aan de generator bevestigd om trillingen uit te dempen. Het rotor‘vlak’ is trouwens in werkelijkheid een kegel met een zeer flauwe hoek van  $176^\circ$ , zie fig. 3. Bij het draaien zal de centrifugaalkracht de winddruk op de bladen compenseren.

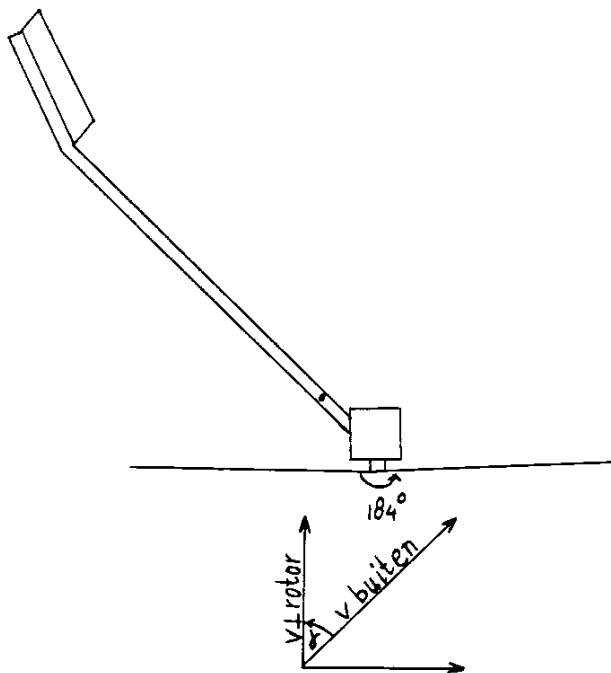


Fig. 3. Windsnelheid buiten ontbonden in een component loodrecht op de rotor.

### De generator

De generator zet Pas om in elektrische energie. Ze levert een klemspanning ( $U_{gen}$ ) die afhankelijk is van  $n$  en de belastingstroom ( $I_{gen}$ ). De klemspanning zonder belasting ( $E_{mk}$ ) is evenredig met  $n$ , bij aansluiting van een belastingweerstand ( $R_b$ ) daalt de spanning door de spanningsval over de inwendige weerstand ( $R_i$ ). Het vermogen dat de generator levert ( $P_{gen}$ ) is het product van  $U_{gen}$  en  $I_{gen}$ . We onderscheiden twee ter zake doende rendementen: het elektrische rendement en het mechanische rendement.

Het elektrische rendement heeft betrekking op de verliezen in de koperwikkelingen als hier een stroom doorheen vloeit. Deze koperverliezen zijn evenredig met de stroomsterkte in het kwadraat ( $P=I^2R_i$ ).

Het mechanische rendement heeft betrekking op de verliezen die ontstaan in de lagers van de generator en gemakshalve reken ik de hystereseverliezen er ook toe (dit zijn verliezen die in het ijzer ontstaan tijdens het magnetiseren en demagnetiseren bij wisselende magnetische velden). Ze zijn evenredig met  $n$  ( $P_{hys}=cn$ ,  $c$ =machine-constante). We hebben geen last van een tandwieloverbrenging. Dit gaat dan wel ten koste van het elektrische rendement, omdat het vermogen bij een laag toerental wordt onttrokken (en dientengevolge een hoge stroom met de bijbehorende verliezen in  $R_i$ ). Er zijn ook nog wervelstroomverliezen. Ten opzichte van de andere vermogens zijn ze zo klein dat ze mogen worden verwaarloosd.

De generator is een gemodificeerde elektromotor. Het ronddraaiende deel is vervangen door een ijzeren cilinder met enorm sterke permanente neodymium magneten. De stroom die hij opwekt wordt via een ondergrondse kabel naar de werkplaats van de WOT geleid, waar dit wordt gemeten (fig. 4).

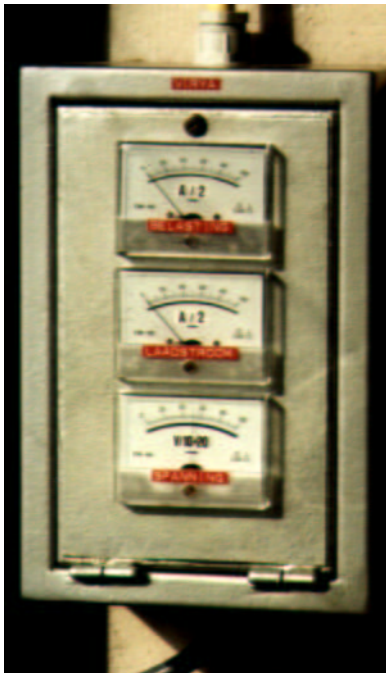


Fig. 4. Meetinrichting voor de laad- en ontladstroom en de accu spanning.

### De toren

Deze vormt de basis van de windgenerator. Dit stalen gevaarte van zo'n twaalf meter hoog is zo ontworpen dat een flexibel geheel is. Eventuele trillingen afkomstig van de rotor door onbalans worden erin opgevangen. Je ziet hem dan 'buikdansen'. Hij steunt op een fundament dat oorspronkelijk gebruikt werd voor de Kijito-molen. Daarom is deze overdreven zwaar.

### De windvaan

Deze zorgt dat de rotor op de wind staat. Samen met de rotor vormt zij tevens de stormbeveiliging. Dat werkt als volgt: bij lage  $v$  hangt de vaan naar beneden en zijn de windkracht op de vaan en rotor zodanig dat de rotor op de wind gericht is. Bij toenemende windkracht gaat de scharnierend opgehangen vaan geleidelijk kantelen zodat de kracht op de rotor meer toeneemt dan op de vaan. Het gevolg is dat de staart van de molen zich op een nieuw evenwicht instelt waarbij de rotor uit de wind gedraaid is (het kruien). De  $v$  die de rotor daarbij treft wordt lager. Die  $v$  kan worden gevonden door  $v$  buiten vectoriëel te ontbinden (zie fig. 3). Het effect hiervan wordt bij toenemende  $v$  zeer groot: bij zo'n 8 m/s begint de rotor geleidelijk uit de wind te draaien en dit is dan dus tevens  $v$  die de rotor treft. Bij windkracht 12 (35 m/s) is de rotor ongeveer  $70^\circ$  uit de wind gedraaid en 'ziet' deze een  $v$  van slechts 11 m/s. Realiseren we ons het exponentiële verband tussen de windsnelheid en het vermogen, dan is de invloed van de stormbeveiliging inderdaad gigantisch groot.

Uit bovenstaande blijkt dat 11 m/s de maximale windsnelheid is waarmee we hoeven te rekenen. Men zou ook kunnen uitgaan van  $v$  buiten, maar dan moeten we in verband met het uit de wind draaien een veranderende  $C_p$ - $\lambda$ -kromme verdisconteren<sup>4</sup>. Dit vereenvoudigt het rekenwerk niet.

### Beveiligingen

Bij de Virya kunnen twee vormen van beveiliging worden onderscheiden: de stormbeveiliging en de acculaadbeveiliging.

Twee aspecten van stormbeveiliging zijn reeds genoemd: de kegelvorm van de rotor en de windvaan. Verder kan de generator in noodgevallen via een stekkerverbinding eenvoudig worden losgenomen en kortgesloten. De generator draait daarbij zeer zwaar waardoor de rotor niet op hol slaat. Wordt er zelfs een vliegende storm verwacht, dan kan de scharnierend bevestigde toren ook nog worden neergelaten.

De acculaadbeveiliging bestaat uit een elektronische schakeling, waaronder een 49-tal transistoren op een aluminiumplaat van één vierkante meter (zie fig. 5). Hierdoor wordt de stroom van de molen omgezet in nuttige warmte als de accu vol is (bij een accuspanning van 27,8 Volt).

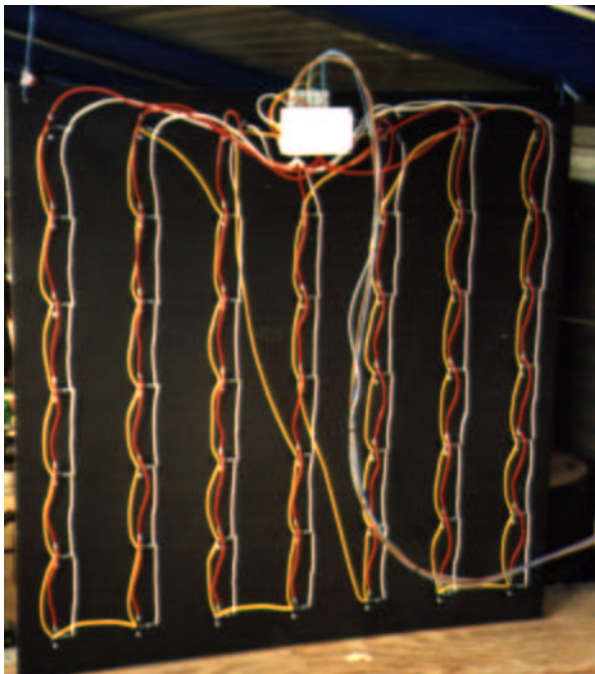


Fig. 5. Bedrading naar de transistoren op de stookplaat

<sup>4</sup> A. Kragten, *Aanpassing van windmolen en generator*, St.-Oedenrode, 1994

### Van vermogenscoëfficiënt naar totaalrendement

Zoals uit het bovenstaande naar voren is gekomen, moet  $n$  evenredig met  $v$  zijn om zoveel mogelijk energie uit de wind te halen. Als  $v$  toeneemt zal het koppel dat de rotor levert dan kwadratisch toenemen, zodat het product van koppel en toerental, het vermogen dat de rotor aan de generator levert, inderdaad met de derde macht toeneemt. De molen zou dan bij elke windsnelheid het maximaal haalbare vermogen leveren. De werking van de elektronische mutator was hierop gebaseerd.

Toch is bovenstaande redenering niet de juiste. We hebben namelijk ook nog te maken met de generator. Als het maximaliseren van de energie in de rotor als gevolg heeft dat het koppel kwadratisch toeneemt met  $v$ , dan dient het tegenwerkend koppel van de generator ook kwadratisch toe te nemen. De stroom die de generator levert, zou dus kwadratisch moeten toenemen. De koperverliezen nemen daarbij toe met de vierde macht van  $v$  terwijl de energie in de wind 'slechts' toeneemt met de derde macht.

En zie nu: bij optimalisatie van de rotor op de wind, nemen de verliezen in de generator met toenemende  $v$  naar verhouding meer toe dan wat de rotor aan de generator levert. Het systeem als geheel is dus toch niet geoptimaliseerd! Het vermogen dat de generator levert is lager dan we voor ogen hadden. Men zou de verliezen in de generator dus moeten beperken door de stroom te laten afnemen. Daarbij moeten (gaan)  $n$  en  $\lambda$  dus omhoog. Maar hoeveel? Als  $\lambda$  toeneemt gaat dit onherroepelijk ten koste van  $C_p$ . Ergens zit dus een optimum. En nu we toch bezig zijn ligt het voor de hand ook de mechanische verliezen in de optimalisering te betrekken, omdat blijkt dat deze betrekkelijk hoog zijn<sup>5</sup>.

Resumerend: beschouwen we de rotor, dan moet  $\lambda$  constant zijn. Bekijken we de koperverliezen, dan moet  $\lambda$  zo hoog mogelijk zijn. Ten aanzien van de mechanische verliezen dient  $\lambda$  zo laag mogelijk zijn.

Wat we eigenlijk zouden moeten hebben is niet een  $C_p$ - $\lambda$ -kromme, maar een grafiek waarin het *totaal rendement* tegen  $\lambda$  is uitgezet. Het is eenvoudig in te zien dat bij toenemende  $v$  het toerental en de stroom toenemen, en dat de mechanische en koperverliezen zich daarbij verhoudingsgewijs steeds meer manifesteren. Deze totaalrendement- $\lambda$ -kromme heeft, in tegenstelling tot de  $C_p$ - $\lambda$ -kromme, dus een optimum die van  $v$  afhankelijk is. De consequentie is, dat, willen we een grafiek schetsen van de output van de molen als functie van de windsnelheid (want daar gaat het in eerste instantie om), we eerst de functie die de totaalrendement- $\lambda$ -kromme representeert moeten opstellen, vervolgens naar  $\lambda$  differentiëren en nadien voor meerdere windsnelheden (bijv. 1,2,3...t/m 11) het optimum voor  $\lambda$  moeten bepalen (uiteeraard met de computer). Met dit optimum kunnen, tezamen met de bijbehorende windsnelheid, alle van belang zijnde gegevens worden berekend en in een grafiek worden weergegeven.

Daar we in dit stadium beschikken over een grafiek die het uitgangsvermogen tegen  $v$  uitzet, dienen we, om een elektronische schakeling te realiseren die de molen op uitgangsvermogen optimaliseert,  $v$  te meten. Dit is lastig. We zouden een windmeter kunnen nemen, maar deze meet  $v$  buiten, terwijl het gaat om  $v$  die tegen de rotor blaast (als de molen uit de wind is gedraaid 'ziet' de rotor immers een windsnelheid die beduidend lager ligt). Om in dit probleem te voorzien is het mogelijk  $v$  impliciet te bepalen door de uitgangsspanning op de aansluitkabel te meten. Wat een eventuele elektronische schakeling dus moet regelen is een verband tussen stroom en spanning. Dit functievoorschrift kan worden gevonden door bij de eerder genoemde windsnelheden te bepalen wat de bijbehorende stromen en spanningen zijn en deze in een in een curve tegen elkaar uit te zetten. Via een spreadsheet- of wiskundeprogramma kan het functievoorschrift dan worden gevonden. Tot slot moet dit in bijv. een computer worden ingebakken en het 'brein' van de regelaar is klaar.

---

<sup>5</sup> A. Kragten, *Explanation for measurements performed on a four poles generator equipped with neodymium magnets*, St.-Oedenrode, 1991

## Energieën en rendementen

Men kan de berekeningen zo ingewikkeld maken als men zelf wil. Hieronder worden de belangrijkste formules weergegeven:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \text{ [Watt]} \dots (1) \quad (\pi r^2 \text{ het rotoroppervlak [m}^2\text{)})$$

$$P_{as} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi r^2 v^3 \text{ [Watt]} \dots (2)$$

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi r^2 v^3 - c_n \text{ [Watt]} \dots (3) \quad (P_{as} \text{ minus mechanische verliezen})$$

$P_{el}$  = nog door de computer te bepalen

De formules van de deelrendementen ontstaan door die van de energieën op elkaar te delen:

$$\eta_{air} = (2)/(1) = C_p$$

$$\eta_{mech} = (3)/(2) = 1 - \{c_n / (\rho C_p \pi r^2 v^3)\}, \text{ waarin } n = \lambda v / (2\pi r) \text{ [omwentelingen/s]}$$

$\eta_{el}$  = nog te bepalen

Bij de bepaling van elektrische aspecten van de molen gaan we noodzakelijkerwijs omgekeerd te werk, en beginnen we dus met het rendement. Voor de eenvoud worden een paar aannames gemaakt. Definitie kwaliteitsfactor:

$Q = (E/n)^2 / (R_i + R_k) \text{ [Volt}^2 \cdot \text{s}^2 / (\text{omwenteling}^2 \cdot \text{Ohm})]$ , waarin E de opgewekte Emk [Volt] en E/n de evenredigheidsconstante [Volt.s/omwenteling]. Feitelijk zegt Q iets over de capaciteit van de generator en de weerstand van de aansluitkabel ( $R_k$ ): de kwaliteit van het totale elektrische systeem vóór de mutator. Verder geldt:

$\eta_{el} = R_b / (R_i + R_k + R_b) = x / (x + 1)$ , waarin  $x = R_b / (R_i + R_k)$ . Nu geldt voor het totale elektrische vermogen (dus in  $R_i$ ,  $R_k$  en  $R_b$  samen):

$P_{el} = (E/n)^2 n^2 / (R_i + R_k + R_b) = Q n^2 / (1 + x) \text{ [Watt]}$ . Dit moet gelijk zijn aan het mechanische vermogen (3).

Hieruit volgt:

$$\eta_{el} = 1 - \{2\pi r (\rho C_p \pi r^2 v^2 - c_n) / (Q \lambda^2 v)\}$$

In fig. 6 is één en ander weergegeven. Voor de duidelijkheid is in het blokschema de generator onderverdeeld in drie delen: in het eerste deel worden de mechanische verliezen verwerkt, het tweede deel zet de mechanische energie verliesvrij om naar elektrische energie en het laatste deel brengt de elektrische verliezen in rekening.

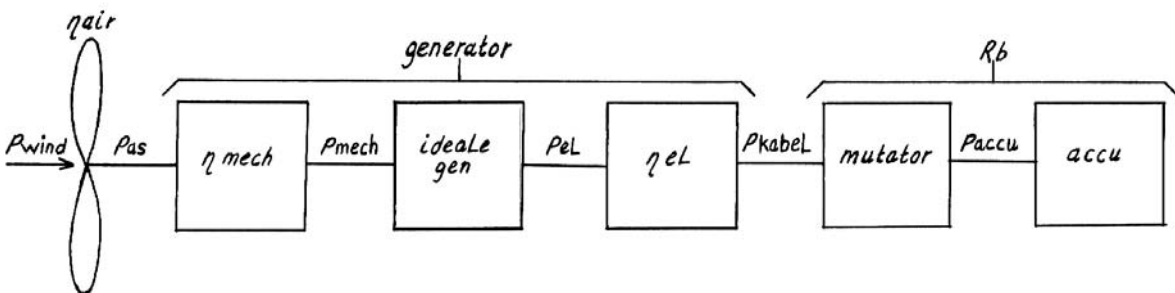


Fig. 6. Blokschema van het elektrische systeem van de Virya-molen.

Tot slot kan de formule die de totaalrendement- $\lambda$ -kromme representeert worden berekend door de deelrendementen met elkaar te vermenigvuldigen.

Nog een aspect moet aan de orde komen, want de computer kan met bovengenoemd totaalrendement alleen rekenen als  $C_p$  in  $\lambda$  wordt uitgedrukt. Zoals eerder opgemerkt blijkt de  $C_p$ - $\lambda$ -kromme grotendeels een kwadratisch verloop te hebben en wel volgens de vergelijking:  $C_p = C_{pmax} [1 - \{(\lambda - \lambda_{opt}) / (\lambda_{max} - \lambda_{opt})\}^2]$ , met  $C_{pmax}$  de maximaal haalbare waarde van  $C_p$ ,  $\lambda_{opt}$  de waarde van  $\lambda$  waarbij  $C_p = C_{pmax}$  en  $\lambda_{max}$  de hoogst mogelijke snelheid van de rotor (dus als deze niet belast wordt). Zie fig. 7.



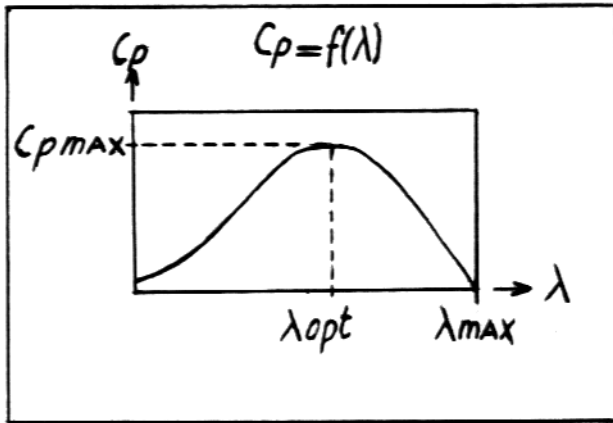


Fig. 7. Kwadratisch verloop van de  $C_p$ - $\lambda$ -kromme met daarin  $C_{pmax}$ ,  $\lambda_{opt}$ , en  $\lambda_{max}$ .

Aannemende dat uit de berekeningen volgt dat  $\lambda$  niet al teveel afwijkt van  $\lambda_{opt}$ , mag de computer rekenen met dit kwadratische verband. Achteraf blijkt deze hypothese de juiste. Van de berekende gegevens is een spreadsheet gemaakt waarvan de grafieken in fig. 8a t/m 8d worden getoond.

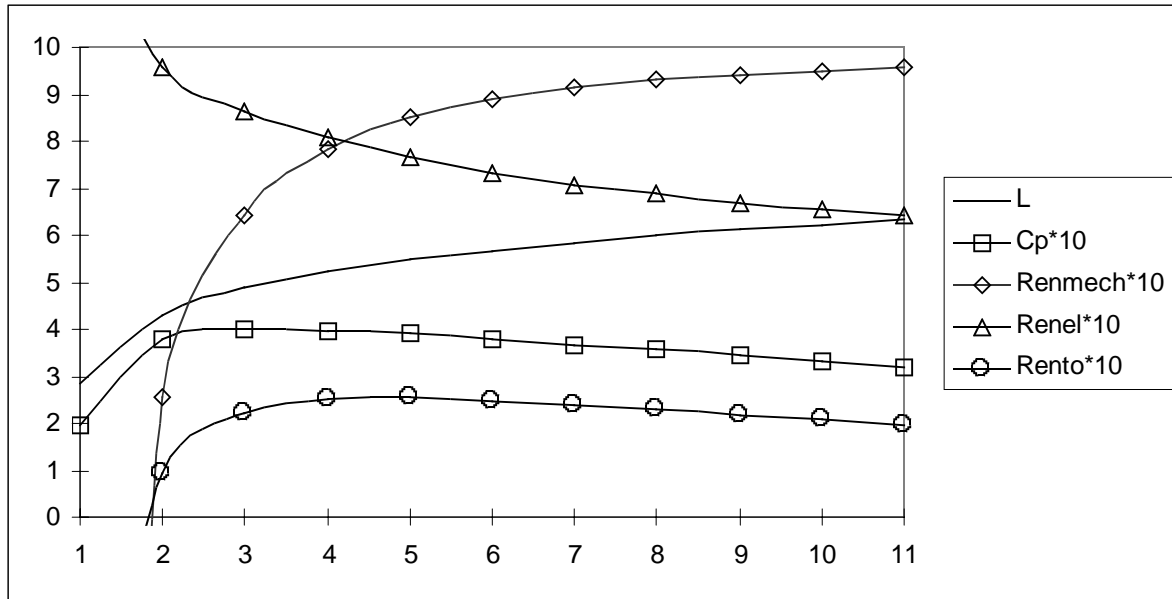


Fig. 8a. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

L=snellopendheid

$C_p$ =vermogenscoëfficiënt

$Ren_{mech}$ =mechanisch rendement van de generator

$Ren_{el}$ =elektrisch rendement van de generator

$Ren_{to}$ =het totaalrendement

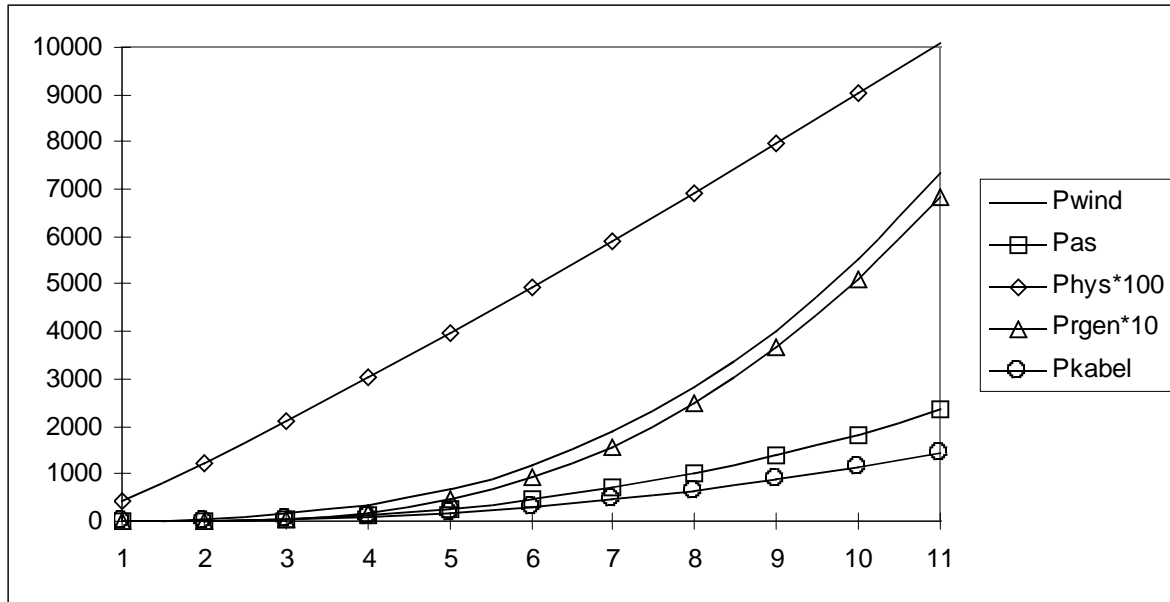


Fig. 8b. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:  
 Pwind=vermogen in de wind die tegen de rotor blaast (in Watt)  
 Pas=het asvermogen van de generator (in Watt)  
 Phys=hystereseverliezen in de generator (in Watt)  
 Prgen=vermogensverlies in Ri (in Watt)  
 Pkabel=het vermogen uit de aansluitkabel van de generator (in Watt)

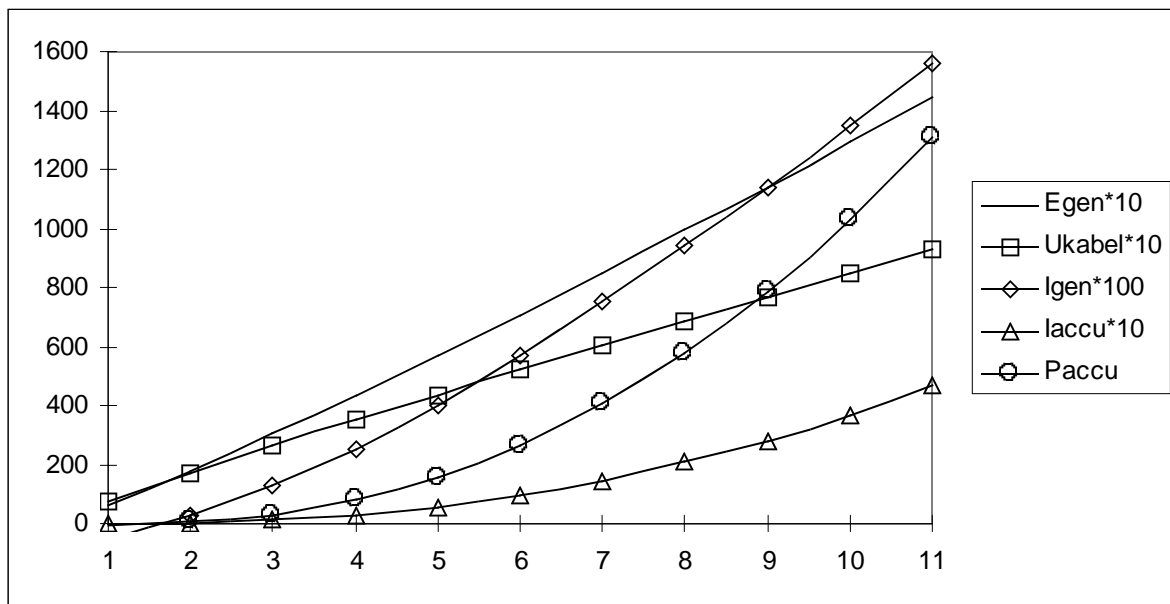


Fig. 8c. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:  
 Egen=de opgewekte Emk van de generator (in Volt)  
 Ukabel=de spanning op de aansluitkabel (in Volt)  
 Igen=de stroom die de generator levert (na gelijkrichting) (in Ampère)  
 Iaccu=accu laadstroom (in Ampère)  
 Paccu=het laadvermogen van de accu (in Watt)

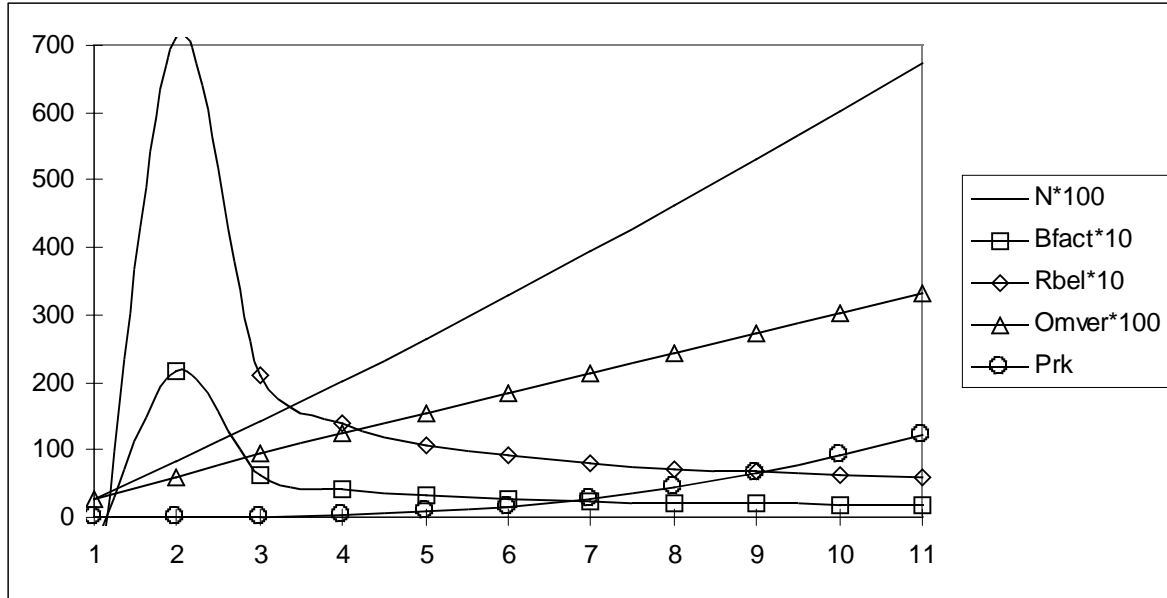


Fig. 8d. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

$N$ =toerental (in omw./sec.)

$B_{fact}$ =belastingsfactor (komt overeen met  $x$ )

$R_{bel}$ =de berekende optimale belastingsweerstand (in Ohm)

$Om_{ver}$ =omzetverhouding tussen  $U_{kabel}$  en  $U_{accu}=28$  Volt (moet de mutator transformeren)

$Pr_k$ =de vermogensverliezen in de aansluitkabel (in Watt)

In fig. 9 is nog een grafiek bijgevoegd die het vermogen van het geoptimaliseerde ontwerp vergelijkt met het originele ontwerp. Daarbij kan een zg. delta (D)- en ster (S)-schakeling worden onderscheiden. De eerste levert een hogere spanning en kan de accu al bij lage  $v$  laden, de laatste levert een hogere stroom en is zonder optimalisering het best bij hoge  $v$  aan de accu aangepast. Het blijkt dat het originele concept zelfs iets beter presteert dan het geoptimaliseerde. Dit komt door het beperkte rendement (90%) van de elektronische mutator die dan moet worden gebruikt en de weerstand van de aansluitkabel. Van het originele ontwerp zijn geen vergelijkende gegevens beschikbaar van windsnelheden boven de 9 m/s.

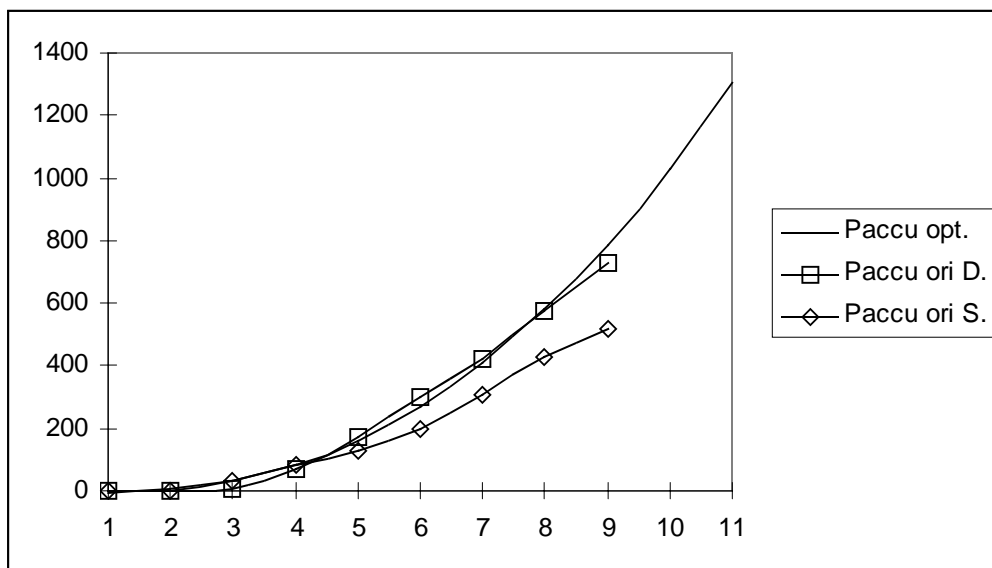


Fig. 9. Vermogens als functie van de windsnelheid.

Tussen  $v=0$  en  $2$  m/s blijkt  $P_{acc}$  negatief te zijn. De fysische betekenis hiervan is dat er elektrisch vermogen moet worden toegevoegd om de molen geoptimaliseerd te laten draaien. De energie in de wind is dan lager dan de mechanische verliezen. Uiteraard zal dit in de praktijk niet voorkomen; de rotor staat gewoon stil tot deze bij  $v=3$  m/s het kleeftkoppel van de generator overwint (denk aan een fietsdynamo die een lichte kracht nodig heeft om op gang te komen). Uit de grafiek blijkt dat het originele ontwerp zeer goed is aangepast en een geoptimaliseerd ontwerp geen verbetering oplevert. Hierom is van een elektronische regeling afgezien.

In fig. 10 is de eerder genoemde  $I_{gen}$ - $U_{kabel}$ -curve weergegeven met daarin de windsnelheden. Deze voldoet ongeveer aan het functievoorschrift:  
 $I_{gen} = 0,001395 U_{kabel}^2 + 0,05355 U_{kabel} - 0,9$

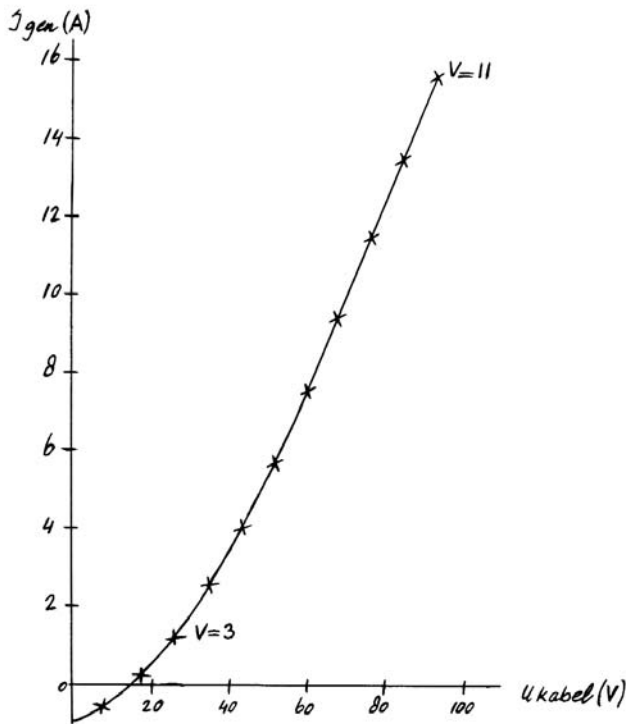


Fig. 10. Generatorstroom als functie van de spanning op de aansluitkabel, volgend uit de berekeningen.

Tot slot in fig. 11 nog een Sankey-diagram van de energieën in de geoptimaliseerde situatie, bij een windsnelheid op de rotor van  $9$  m/s.

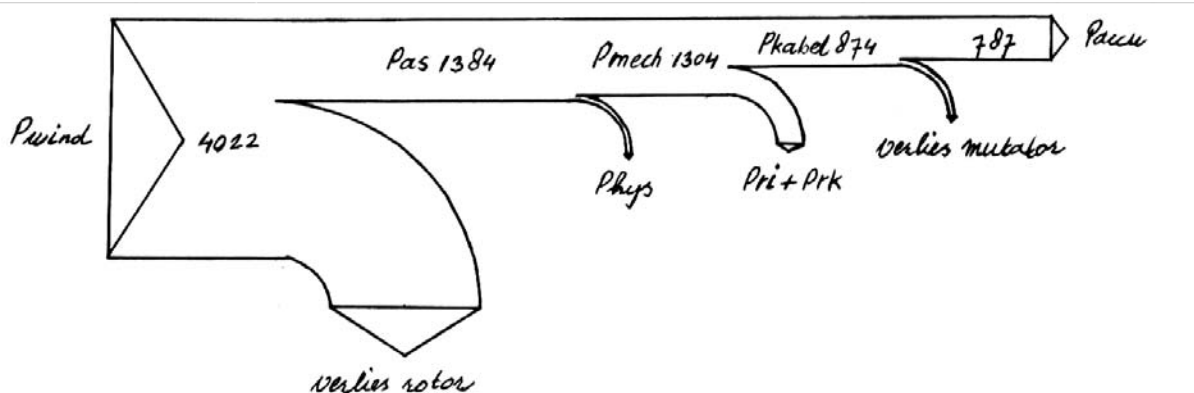


Fig. 11. Sankey-diagram van de vermogens (in Watt).