

## Hoe nauwkeurig zijn cup-anemometers?

***Citation for published version (APA):***

Schotte, J. A., Smulders, P. T., & van Meel, J. J. E. A. (1985). *Hoe nauwkeurig zijn cup-anemometers?* (TU Eindhoven. Vakgr. Transportfysica : rapport; Vol. R-761-D). Technische Hogeschool Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/1985

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

***Please check the document version of this publication:***

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

***General rights***

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Hoe nauwkeurig zijn cup-anemometers?

Hans Schotte  
Paul Smulders  
Joop van Meel

november 1985

R-761-D

Paper gepresenteerd op de Nationale Wind  
Energie Conferentie, december 1985,  
Noordwijkerhout



<b>CONSULTANCY SERVICES</b>	P.O. BOX 85
<b>WIND ENERGY</b>	3800 AB AMERSFOORT
<b>DEVELOPING COUNTRIES</b>	THE NETHERLANDS

WINDENERGIE GROEP

Vakgroep Transportfysica  
Afd. der Technische Natuurkunde  
Technische Hogeschool Eindhoven  
Postbus 513  
5600 MB EINDHOVEN

## HOE NAUWKEURIG ZIJN CUP-ANEMOMETERS?

Hans Schotte, Paul Smulders, Joop van Meel.

Windenergie groep, vakgroep Transport fysica, afdeling Technische Natuurkunde, Technische Hogeschool Eindhoven.

### SAMENVATTING.

Voor het nauwkeurig meten van windsnelheden wordt veelal gebruik gemaakt van cup-anemometers. Er wordt algemeen aangenomen, dat de relatie tussen de windsnelheid en het uitgangssignaal van de anemometer lineair is. In de fabrieksspecificaties wordt meestal alleen gesproken over een evenredigheidsfactor, m.a.w. grafische weergave zou een lijn door de oorsprong moeten geven.

In het najaar van '84 zijn zeventien cup-anemometers nauwkeurig geïjkt (in de van tevoren geïjkte windtunnel van de T.H.Eindhoven en 3 daarvan ook nog bij het KNMI in de Bilt). Hieruit is gebleken, dat er een systematische afwijking van de "fabriekslijn" optreedt, in die zin, dat de ijklijn verschoven is ten opzichte van de lijn door de oorsprong. Bovendien bleek de helling van alle ijklijnen een fractie groter dan de door de fabrikanten opgegeven waarde. Eén en ander heeft tot gevolg, dat de meeste anemometers niet voldoen aan de door het IEA (International Energy Agency) en de WMO (World Meteorological Organisation) opgestelde normen voor windmeters. Als er 0,5 m/s bij de snelheid wordt opgeteld, voldoen deze meters wel aan de normen.

Voor de verschuiving van de ijklijn is een mogelijke verklaring gevonden door de interne wrijving van de anemometers in een (stationair) model te verwerken.

Om het niet-lineaire dynamische gedrag van de anemometers te beschrijven is uitgegaan van een vereenvoudigd model, waarin de wrijving wordt verwaarloosd. Van belang daarbij is een voor elke anemometer karakteristieke afstandkonstante. Met behulp van een eenvoudige methode is voor zeven verschillende typen anemometers deze konstante bepaald en vergeleken met de normen. Twee van deze meters bleken hieraan niet te voldoen.

### 1. INLEIDING.

In het kader van de werkzaamheden van de CWD is de nauwkeurigheid van verschillende cup-anemometers onderzocht. Een cup-anemometer (fig. 1) bestaat in principe uit twee delen:

- het roterende gedeelte met (meestal) 3 cups (dat de windsnelheid  $V$  omzet in een rotatiesnelheid  $\Omega$ ) en
- het gedeelte dat de signaalgever bevat (die de rotatiesnelheid omzet in een elektrisch signaal met een bepaalde frequentie  $f$ , of een spanning)

Het stationaire gedrag wordt vastgelegd in een ijkarakteristiek tussen  $V$  en  $f$ . Het dynamische gedrag wordt gekarakteriseerd door de reactiesnelheid van de meters op stapvormige veranderingen in de windsnelheid.

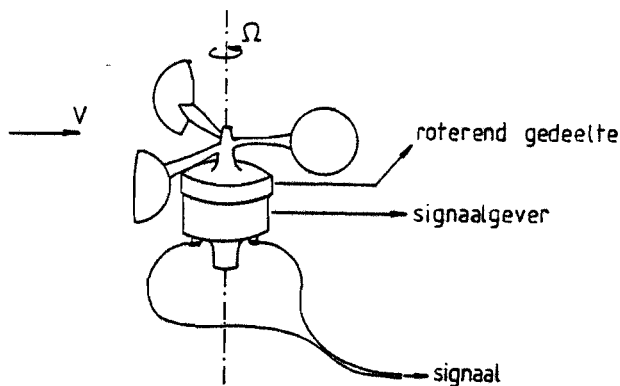


fig. 1 Cup-anemometer.

2. DE WINDTUNNEL.

Bij de bestudering van het gedrag van de windmeters is gebruik gemaakt van een windtunnel van de vakgroep Transport Fysika, waarin de windsnelheid nauwkeurig kan worden ingesteld. Deze windtunnel is in principe een gesloten systeem, maar voor het uitvoeren van de metingen is het meetsegment verwijderd. Om een indruk te krijgen over de nauwkeurigheid van de windtunnel, zowel wat betreft de uniformiteit van de stroming als de afgelezen tunnelsnelheid, is de verdeling van de snelheid gemeten bij twee verschillende snelheden en op twee verschillende afstanden van de uitstroomopening (zie fig. 2).

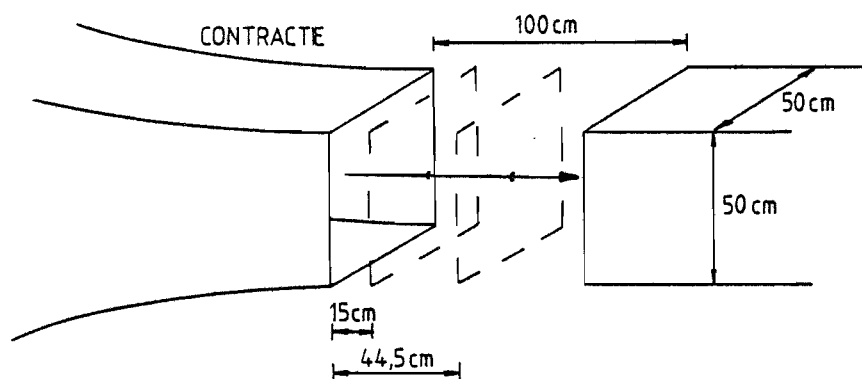


fig. 2 Doorgemeten vlakken in de windtunnelstroming.

Bij deze metingen is met een pitotbuis, die op een bepaald punt in de stroming werd geplaatst, de snelheid op die plaats bepaald. Deze is vergeleken met de tunnelsnelheid, zoals die berekend is

uit het vóór de meetsectie gemeten drukverschil over de contractie. In fig. 3 zijn de resultaten van twee van deze metingen weergegeven. De getalwaarden geven het procentuele verschil tussen de gemeten snelheden.

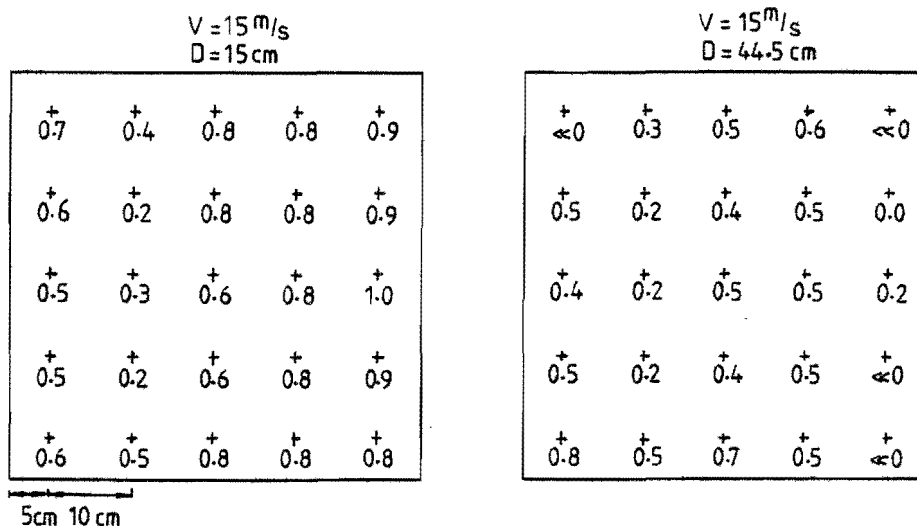


fig. 3 Resultaten van uniformiteitsmetingen in de THE-windtunnel.

Uit de metingen blijkt allereerst, dat de stroming goed uniform is: de variaties tussen de punten onderling worden gekarakteriseerd door een standaarddeviatie van 0,2% (de randpunten bij de metingen op 44,5 cm zijn buiten beschouwing gelaten), hetgeen van dezelfde grootte orde is als de meetonnauwkeurigheid. Verder lijkt het alsof er sprake is van een systematische fout van gemiddeld ongeveer 0,7%. Tenslotte is gebleken, dat de stroming dicht bij de uitstroombopening tot op 2 cm van de rand goed uniform is. Verder naar het midden van de meetsectie neemt het uniforme gebied iets af, tot ruim 5 cm van de rand.

Op grond hiervan kan men konkluderen, dat anemometers met een diameter van maximaal 40 cm nauwkeurig geijkt kunnen worden, zeker wanneer ze vooraan in de meetsectie worden geplaatst.

### 3. HET STATIONAIRE GEDRAG: MODEL EN METINGEN.

Wanneer de relatie tussen de rotatiesnelheid van een anemometer ( $\Omega$ ) en het door de anemometer geleverde koppel ( $M$ ) wordt weergegeven in een grafiek dan ontstaat er een verzameling grafieken waarbij de ligging van elke grafiek bepaald wordt door de windsnelheid ( $V$ ). Dit stelsel kan gereduceerd worden tot één grafiek door  $M$  en  $\Omega$  dimensieloos te maken op dezelfde wijze als voor een windrotor wordt gedaan:

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho V^2 \pi r^2 R}, \quad \lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (1)$$

(hierin is  $\rho$  de luchtdichtheid,  $r$  de straal van de anemometercups en  $R$  de straal van het roterende gedeelte van de anemometer, gemeten tot het centrum van de cups).

Het meest voor de hand liggende verband tussen  $C_M$  en  $\lambda$  is een lineaire relatie, als weergegeven in fig. 4. De juistheid van deze aanname wordt ondersteund door metingen van O. Schrenk (lit. 4),

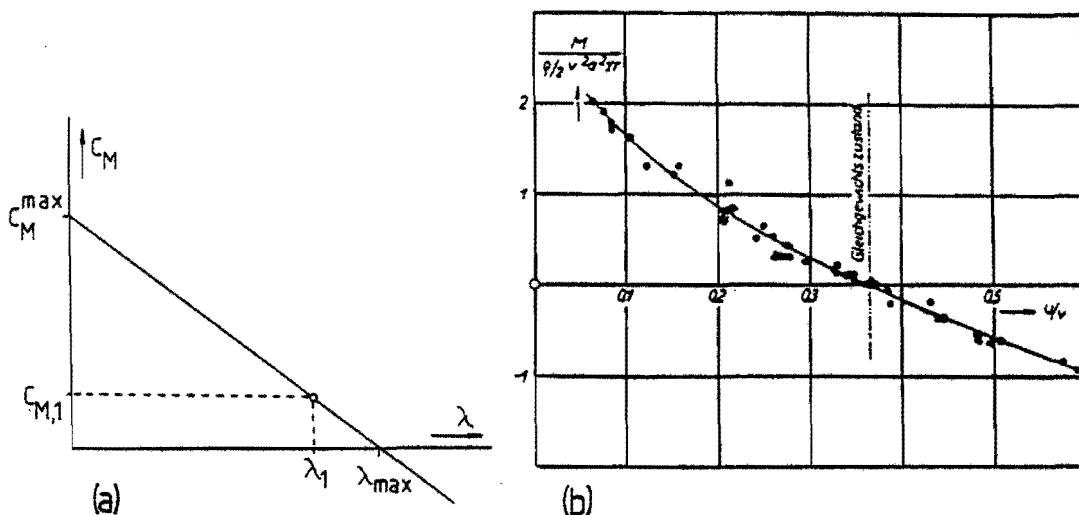


fig. 4 Relatie tussen  $C_M$  en  $\lambda$ , (theoretisch (a), zie vergelijking (2)<sup>M</sup> en experimenteel (b), zie lit. 4).

met name wat het gebied rond het  $\lambda_{\max}$ -punt betreft (zie fig. 4). In dit punt is het door de anemometer geleverde koppel gelijk aan nul, hetgeen overeenkomt met de rotatie van een ideale, d.w.z. onbelaste anemometer. In werkelijkheid is er altijd een bepaalde belasting (wrijving), zodat het werkpunt iets hoger komt te liggen (b.v. bij  $\lambda_1$ , zie fig. 4).

De vergelijking van de in fig. 4 geschetste theoretische lijn luidt:

$$C_M = \frac{C_M^{\max}}{\lambda_{\max}} (\lambda_{\max} - \lambda) \quad (2)$$

Als  $M_W(\Omega)$  het wrijvingsmoment voorstelt (dit hangt van  $V$  en  $\Omega$  af, maar  $V$  is direct gerelateerd aan  $\Omega$ ), dan geldt in stationaire toestand:

$$M = M_W(\Omega) \quad (3)$$

Dit kan met de vergelijkingen (1) en (2) herschreven worden tot:

$$V^2 - \frac{R}{\lambda_{\max}} \Omega V = W(\Omega), \quad (4)$$

$$\text{met } W(\Omega) := \frac{M_W(\Omega)}{1/2 \rho \pi r^2 R C_M^{\max}}$$

De algemene oplossing  $V(\Omega)$  van (4) luidt:

$$V = 1/2 \left( \frac{R\Omega}{\lambda_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{R\Omega}{\lambda_{\max}}\right)^2 + 4W(\Omega)} \right) \quad (5)$$

In de praktijk zal  $W(\Omega)$  meestal klein zijn ten opzichte van  $\left(\frac{R\Omega}{\lambda_{\max}}\right)^2$ , vooral bij hogere windsnelheden.

In dat geval kan (5) vereenvoudigd worden tot:

$$V = \frac{R\Omega}{\lambda_{\max}} + \frac{\lambda_{\max}}{R\Omega} W(\Omega) \quad (6)$$

In het ideale geval is  $W(\Omega) = 0$  en de oplossing levert dan de ideale ijklijn op:

$$V = \frac{R}{\lambda_{\max}} \Omega \quad (7)$$

Vorm van  $W(\Omega)$ .

In principe geeft vergelijking (5) de  $V/\Omega$ -relatie van een cup-anemometer weer, maar deze vergelijking kan ook op een andere manier benaderd worden.

Wanneer namelijk een bepaald verband tussen  $V$  en  $\Omega$  wordt aangenomen, levert (5) de vorm op waaraan  $W(\Omega)$  moet voldoen. Uit de ijklingen volgt dat  $V = a\Omega + b$ . Substitutie in (4) levert op:

$$W(\Omega) = \left(a^2 - \frac{aR}{\lambda_{\max}}\right) \Omega^2 + \left(2ab - \frac{b^2}{\lambda_{\max}}\right) \Omega + b^2 \quad (8)$$

Wanneer de ijklijn parallel loopt aan de ideale ijklijn (7), dan is  $a = R/\lambda_{\max}$ , zodat:

$$W(\Omega) = \frac{bR}{\lambda_{\max}} \Omega + b^2 \quad (9)$$

Mogelijke vormen van  $W(\Omega)$  zijn weergegeven in fig. 5.

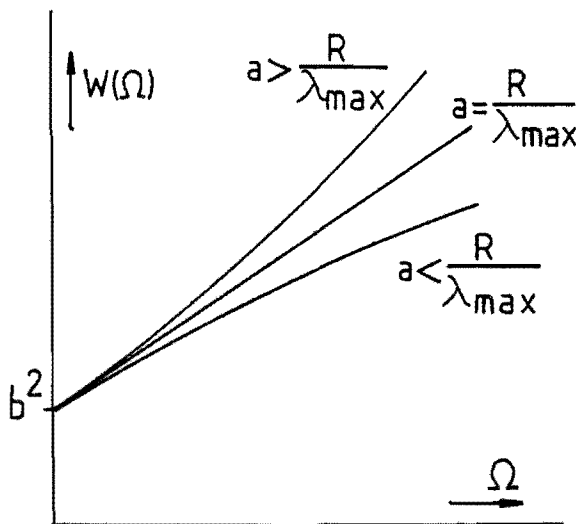


fig. 5 Mogelijke vormen van  $W(\Omega)$ .

Voor kogellagers lijkt de hoogste kromme van fig. 5 aannemelijk. Het verdient aanbeveling nader te bestuderen in hoeverre praktische lagerkarakteristieken overeenstemmen met de hier geschetste.

Korrektie van de  $C_M/\lambda$ -relatie.

Bij bovenstaande afleiding is uitgegaan van een lineaire  $C_M/\lambda$ -relatie zoals die is weergegeven in fig. 4 en vergelijking (2).

Om een betere overeenstemming met de metingen te verkrijgen kan een kleine kwadratische term worden toegevoegd:

$$C_M = C_M^{\max} \left( \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right) + \epsilon \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}\right)^2 \right), \epsilon \ll 1 \quad (10)$$

Hieruit volgt dat (6) en (9) overgaan in respectievelijk:

$$V = \frac{R\Omega}{\lambda_{\max}} + \frac{\lambda_{\max}}{R\Omega} W(\Omega) (1-2\epsilon) \quad (11)$$

$$\text{en } W(\Omega) = \frac{bR}{\lambda_{\max}} \Omega + b^2 (1+\epsilon) \quad (12)$$

De konklusie die hieruit getrokken kan worden is dat een kleine afwijking van het lineaire verband tussen  $C_M$  en  $\lambda$  geen essentiële verschillen geeft met betrekking tot de vorm van de oplossingen  $V(\Omega)$  en  $W(\Omega)$ .

Experimentele resultaten.

Zoals al eerder vermeld is uit de ijkingen gebleken dat  $V(\Omega)$  de vorm  $V = a\Omega + b$  heeft. In feite is  $V(f)$  gemeten, maar via de signaalgever in de anemometer is  $f$  rechtevenredig gerelateerd aan  $\Omega$ . In fig. 6 is een representatieve ijkgrafiek weergegeven.

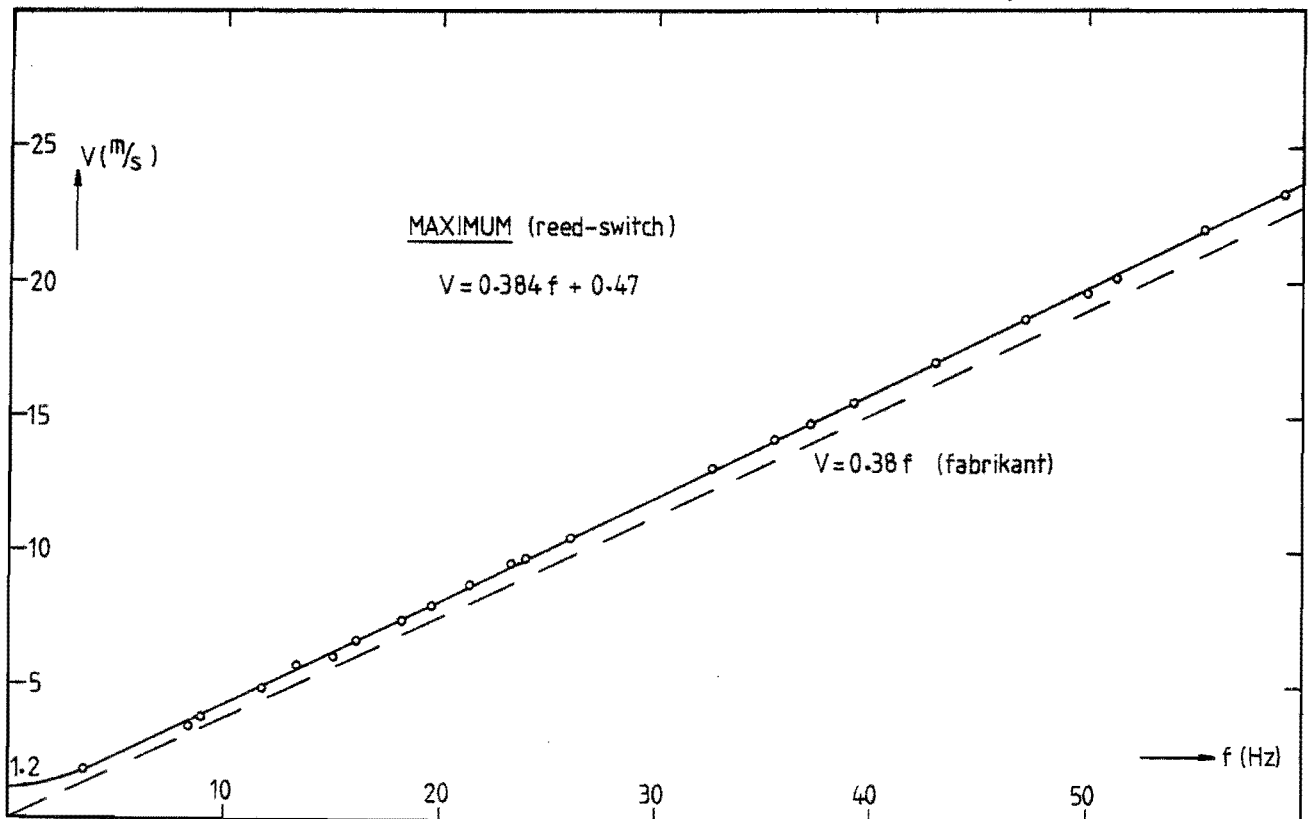


fig. 6 IJkgrafiek van een Maximum windmeter (type reed-switch).



De helling van de ijklijn stemt in alle gevallen goed overeen met de fabrieksgegevens (kleine afwijking naar iets hogere waarden). De coëfficiënt  $b$  bleek bij alle meters van de grootte orde van 0,5 m/s. Dit heeft tot gevolg, dat de fabrieksspecificaties niet voldoen aan de normen van IEA en WMO (resp. fout kleiner dan 5% van 4 m/s tot 25 m/s en fout kleiner dan 0,5 m/s van 1 m/s tot 50 m/s). Een eenvoudige correctie ( $V$  verhogen met 0,5 m/s) betekent dat de meters in bijna alle gevallen wel aan beide normen voldoen. Vooral bij lage windsnelheden, van speciaal belang voor water pompende windmolens betekent een afwijking van 0,5 m/s een grote relatieve fout (bij 2,5 m/s: 20% !).

4. HET DYNAMISCHE GEDRAG: BEWEGINGSVERGELIJKING EN METING VAN DE AFSTANDKONSTANTE.

Als uitgangspunt voor de beschouwing van het dynamische gedrag wordt dezelfde  $C_M/\lambda$ -relatie aangenomen als weergegeven in fig. 4 en vergelijking  $M(2)$ . Bovendien wordt de wrijving verwaarloosd, hetgeen betekent dat elke stationaire toestand wordt weergegeven door het  $\lambda_{\max}$ -punt.

Beschouw nu variaties rond:  $\lambda_{\max} = \frac{\Omega_0 R}{V_0}$  (13)

De bewegingsvergelijking luidt:

$$I \dot{\Omega} = M \quad (14)$$

en is met behulp van (1), (2) en (13) te herschrijven tot:

$$\frac{d}{V_0} \left( \frac{\dot{\Omega}}{\Omega_0} \right) = \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 - \left( \frac{V}{V_0} \right) \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right), \quad (15)$$

met  $d := \frac{I \lambda_{\max}}{1/2 \rho \pi r^2 R^2 C_{M \max}}$

De afstandskonstante  $d$  heeft de dimensie van lengte en bevat behalve  $\rho$  alleen grootheden die karakteristiek zijn voor de desbetreffende anemometer.

Bepaling van de afstandskonstante.

Uit het voorgaande volgt een vrij eenvoudige methode om de waarde van  $d$  te bepalen.

Ga uit van  $V = V_0 (1 + v)$  en  $\Omega = \Omega_0 (1 + w)$  (16)

en wel zodanig dat  $v$  een stapvormige verstoring in de windsnelheid voorstelt.

De responsie van de anemometer op deze verstoring kan met (15) worden afgeleid:

$$\frac{w}{v} = 1 - \exp \left( - \frac{t}{\tau} \right),$$

met  $\tau := \frac{d}{V}$

De responsietijd  $\tau$  blijkt dus omgekeerd evenredig met  $V$ , de eind-waarde van de stapverstoring en hangt dus niet af van de stapgrootte.

Dit is van groot belang voor het gedrag van anemometers in een fluctuerende wind. Blijkbaar reageren windmeters sneller op een toename van de windsnelheid dan op een afname van de snelheid. Dit leidt er toe dat in een fluktuerende wind het door de anemometer aangegeven gemiddelde te hoog ligt: de meter overschat de gemiddelde windsnelheid.

De mate van overschatting is natuurlijk sterk afhankelijk van het soort fluctuaties (amplitude, eventuele periode), maar hangt ook sterk af van de karakteristieken van de anemometer. De bepalende grootte hierbij is de in vergelijking (15) gedefinieerde afstandskonstante  $d$ . Voor verschillende typen cup-anemometers is de waarde van  $d$  bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de opstelling zoals die in fig. 7 is geschetst.

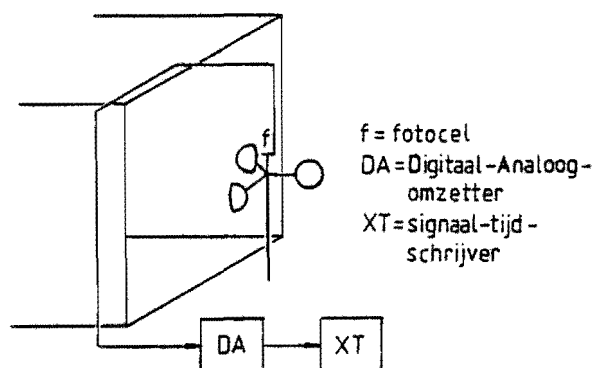


fig. 7 Meetopstelling voor de bepaling van afstandskonstanten.

Op elke anemometer is een uitwendige foto-chopper gemonteerd (een schijfje met 24 openingen, dat omvat wordt door een stilhangende optocoupler). Op een schrijver wordt het uitgaande signaal na integratie geregistreerd.

De stapvormige verandering van de windsnelheid wordt gesimuleerd door bij konstante windsnelheid de anemometer stil te houden en los te laten. Uit de responsiekromme kan grafisch de waarde van de tijdkonstante  $\tau$  worden bepaald, waaruit met vergelijking (17)  $d$  kan worden berekend (de stapgrootte is uiteraard bekend).

Uit de resultaten, die gegeven zijn in tabel 1, blijkt dat twee van de zeven onderzochte windmeters niet aan de norm van het IEA en de WMO voldoen ( $d$  kleiner dan 5 meter).

tabel 1. Afstandskonstanten van verschillende cup-anemometers.

windmeter	$d$ (m)	
Pipo (THE-fabriek)	1,55	+ 0,05
Maximum (type: AC-generator)	2,9	+ 0,2
Maximum (type: reed-switch)	3,0	+ 0,2
Theodor Friedrichs & Co. (type: 4041.0100)	4,7	+ 0,2
Thies (type: 4.3300.10)	4,9	+ 0,2
Lambrecht (type: 1469 J 0,1)	5,4	+ 0,2
Casella (type: W 1254/2)	12,7	+ 0,4

In fig. 8 is een voorbeeld van een stapresponsie weergegeven. Bovendien is de theoretische (ideale) orde-responsie ingetekend, waarbij is uitgegaan van de uit de praktische responsie bepaalde tijdkonstante.

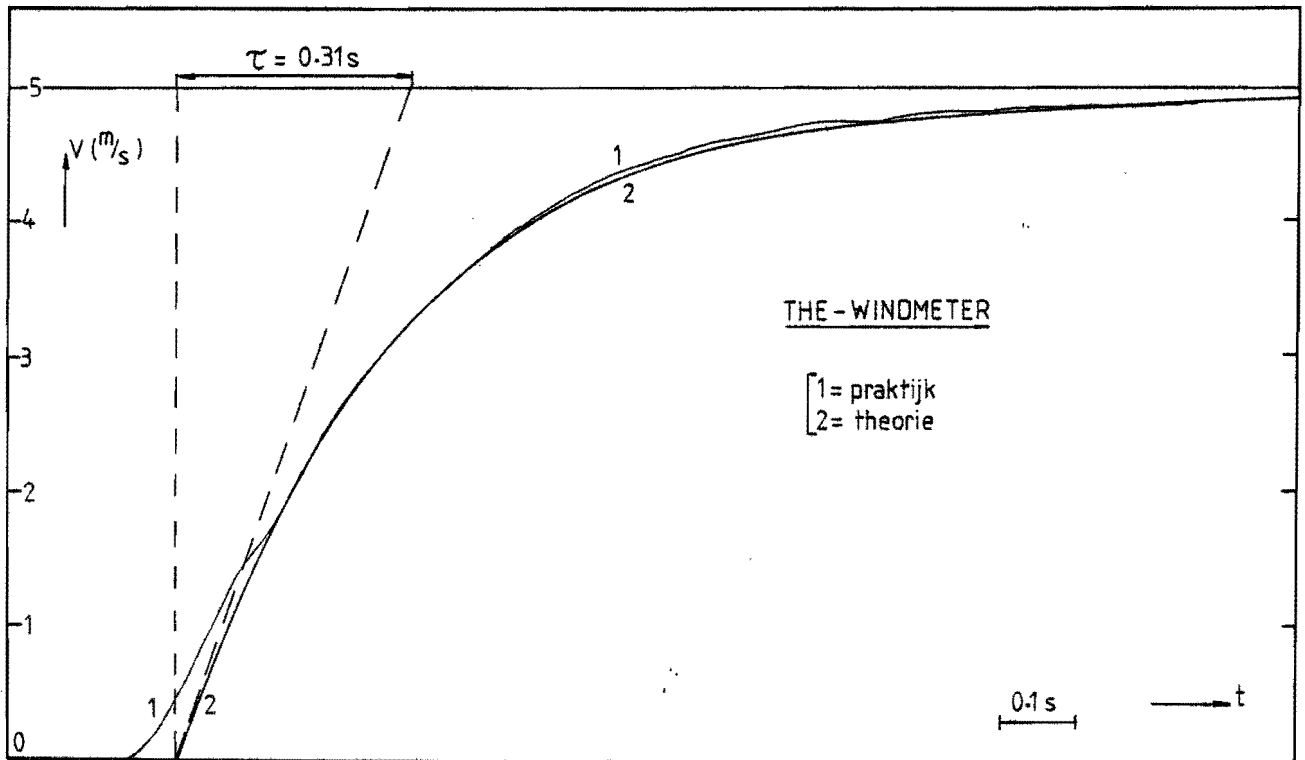


fig. 8 Stapresponsie van de THE-windmeter.

## 5. KONKLUSIES.

Het is gebleken dat de windsnelheid in de THE-windtunnel nauwkeurig kan worden ingesteld en dat de stroming zeer goed uniform is (standaarddeviatie van 0,2% over een doorsnede vlak).

Het is dan ook mogelijk om in deze windtunnel cup-anemometers nauwkeurig te ijken. Ijkingen verricht in deze windtunnel, stemmen goed overeen met ijkingen van dezelfde meters door het KNMI. De resultaten van de ijkingen geven aan, dat de ijklijnen de vorm  $V = c.f + b$  hebben ( $V$  = windsnelheid,  $f$  = frequentie van uitgangssignaal). De helling  $c$  stemt goed overeen met de fabrieksgegevens (afwijking van ca. 1% naar iets hogere waarden); de waarde van  $b$  is van de grootte orde van 0,5 m/s. Dit laatste heeft tot gevolg, dat de meeste meters bij gebruik van de fabrieksijkingen niet voldoen aan de internationaal geldende normen voor windmeters, opgesteld door het IEA (toegestane afwijking maximaal 5%) en de WMO (afwijking maximaal 0,5 m/s). Uit de ijkresultaten volgt dat door een eenvoudige correctie ( $V$  verhogen met 0,5 m/s) de meeste meters wel aan de normen voldoen.

Het dynamische gedrag van de windmeters is onderzocht door de afstandkonstante van elk type meter te bepalen. Dit is gebeurd aan de hand van een methode waarbij de windmeter wordt stilge-

houden en daarna losgelaten, zodat een stapvormige verandering van de windsnelheid wordt gesimuleerd.

Het IEA en de WMO hanteren ook voor de afstandkonstante een norm: deze mag maximaal 5 m zijn.

Twee van de zeven onderzochte cup-anemometers voldoen niet aan deze norm. Er is een eenvoudig model opgesteld voor het dynamische gedrag. Dit blijkt zeer goed de vorm van de dynamische responsies te voorspellen.

#### LITERATUUR.

1. H. Schotte, "Nauwkeurigheid van windmeters", intern rapport THE, nr. R-697-S, jan. 1985;
2. S. Frandsen e.a., "1. Power performance testing", IEA, 1982;
3. WMO, "Guide to meteorological instruments and methods of observation", 5th edition, Genève, 1983;
4. O. Schrenk, "Ueber die Trägheitsfehler des Schalenkreuz-Anemometers bei schwankender Windstärke", Zeitschr. f. techn. Physik, 1929;
5. H.W. Baynton, "Errors in windrun estimates from rotational anemometers", Bulletin American Meteorological Society, Vol. 57, No. 9, sept. 1976;
6. E.H. Lysen, "Introduction to windenergy", CWD 82-1, 1982.