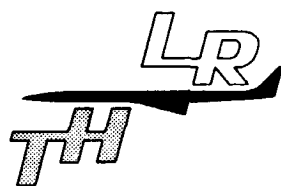


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK



Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

Memorandum M-445

De berekening van het omspoeld gondeloppervlak
van enkel- en dubbelstroom straalmotoren
voor civiele vliegtuigen.

door

E. Torenbeek
G.H. Berenschot

Delft - Nederland

Januari 1983

Samenvatting

Dit memorandum beschrijft de afleiding en verificatie van enkele eenvoudige rekenregels, welke in het voorontwerp stadium van civiele straalvliegtuigen kunnen worden gebruikt om de belangrijkste afmetingen en het uitwendige om- spoelde oppervlak te berekenen van motorgondels voor enkel- en dubbelstroom- straalmotoren met axiale compressoren. Verschillende formules worden gepresen- teerd waarvan de toepasbaarheid afhangt van de beschikbare gegevens. Met de gedetailleerde methoden wordt een nauwkeurigheid van ca. 6,5 % bereikt. De eenvoudigste heeft een standaarddeviatie van ca. 12 %.

1. Inleiding 1

2. Beschrijving van de motorgondel 2

3. Afleiding van de rekenregels 3

4. Verificatie van de rekenregels 4

5. Conclusie 5

6. Literatuurverwijzingen 6

7. Bijlagen 7

8. Samenvatting 8

9. Samenvatting 9

10. Samenvatting 10

11. Samenvatting 11

12. Samenvatting 12

13. Samenvatting 13

14. Samenvatting 14

15. Samenvatting 15

16. Samenvatting 16

17. Samenvatting 17

18. Samenvatting 18

19. Samenvatting 19

20. Samenvatting 20

21. Samenvatting 21

22. Samenvatting 22

23. Samenvatting 23

24. Samenvatting 24

25. Samenvatting 25

26. Samenvatting 26

27. Samenvatting 27

28. Samenvatting 28

29. Samenvatting 29

30. Samenvatting 30

31. Samenvatting 31

32. Samenvatting 32

33. Samenvatting 33

34. Samenvatting 34

35. Samenvatting 35

36. Samenvatting 36

37. Samenvatting 37

38. Samenvatting 38

39. Samenvatting 39

40. Samenvatting 40

41. Samenvatting 41

42. Samenvatting 42

43. Samenvatting 43

44. Samenvatting 44

45. Samenvatting 45

46. Samenvatting 46

47. Samenvatting 47

48. Samenvatting 48

49. Samenvatting 49

50. Samenvatting 50

51. Samenvatting 51

52. Samenvatting 52

53. Samenvatting 53

54. Samenvatting 54

55. Samenvatting 55

56. Samenvatting 56

57. Samenvatting 57

58. Samenvatting 58

59. Samenvatting 59

60. Samenvatting 60

61. Samenvatting 61

62. Samenvatting 62

63. Samenvatting 63

64. Samenvatting 64

65. Samenvatting 65

66. Samenvatting 66

67. Samenvatting 67

68. Samenvatting 68

69. Samenvatting 69

70. Samenvatting 70

71. Samenvatting 71

72. Samenvatting 72

73. Samenvatting 73

74. Samenvatting 74

75. Samenvatting 75

76. Samenvatting 76

77. Samenvatting 77

78. Samenvatting 78

79. Samenvatting 79

80. Samenvatting 80

81. Samenvatting 81

82. Samenvatting 82

83. Samenvatting 83

84. Samenvatting 84

85. Samenvatting 85

86. Samenvatting 86

87. Samenvatting 87

88. Samenvatting 88

89. Samenvatting 89

90. Samenvatting 90

91. Samenvatting 91

92. Samenvatting 92

93. Samenvatting 93

94. Samenvatting 94

95. Samenvatting 95

96. Samenvatting 96

97. Samenvatting 97

98. Samenvatting 98

99. Samenvatting 99

100. Samenvatting 100

Inhoud:Blz.:

Samenvatting	I
Inhoud	II
Notaties	III
1. Inleiding.	1
2. Klassificering van motorinstallaties.	2
3. Berekening van het gondeloppervlak uit installatie- tekeningen.	3
4. Het gondeloppervlak als functie van de inlaatdiameter en de gondellengte.	4
4.1. Het oppervlak A_f bij gegeven inlaatdiameter en gondellengte.	5
4.2. De verhouding A_g/A_f .	5
4.3. Het totale gondeloppervlak A_n .	6
5. Berekening van de inlaatdiameter D_i .	7
6. De gondellengte l_n .	8
6.1. De totale gondellengte.	9
6.2. Invloed van de gondellengte-verhouding φ .	10
7. Gondeloppervlak als functie van de luchtmassastroom.	12
8. Het gondeloppervlak als functie van de startstuwkracht.	13
8.1. Verband tussen stuwkracht en luchtmassastroom.	13
8.2. Bepaling van het gondeloppervlak uit T_{to} en G .	14
8.3. Grove benaderingen.	15
9. Samenvatting van de resultaten.	16
10. Literatuur.	17
11. Tabel.	
12. Figuren.	

Notaties

A	- (omspoeld) oppervlak	[m ²]
a	- geluidssnelheid	[m/s]
b	- (gondel)breedte	[m]
C ₁	- konstante in vgl. (18)	
D	- (gondel) diameter (zie ook Fig. 2)	[m]
f	- korrektiefactor op het omspoelde oppervlak	
G	- gasgeneratorfunctie (zie lit. 1, Appendix H)	
h	- (gondel) hoogte	[m]
l	- (gondel) lengte (zie Fig. 2)	[m]
M	- getal van Mach	
m _a	- luchtmassastroom per tijdseenheid	[kg/s]
T _{to}	- statische stuwkracht (start, zeeniveau, ISA)	[N]
v	- in- of uitstroomsnelheid	[m/s]
β	- parameter die de plaats van het grootspant bepaalt	
λ	- omloopverhouding ($\lambda = m_f/m_g$)	
φ	- relatieve fangondellengte ($\phi = l_f/l_n$)	
μ	- massastroomparameter ($\mu = m/(\rho_o a_o)$)	[m ²]

Indices

O	- kondities op zeeniveau
a	- (inlaat)lucht
c	- uitlaatconus (deel dat uitsteekt)
e	- uitlaat
f	- fangondel
g	- gasgeneratorgondel
h	- voorrand van de gondel
i	- inlaat
n	- gondel (fan + gasgenerator)
s	- spinner in inlaat

1. Inleiding.

In de voorontwerpfase van vliegtuigen wordt ten behoeve van weerstands- en gewichtsberekeningen vaak gebruik gemaakt van het uitwendige (z.g. "omspoelde") oppervlak van de motorgondels waarin enkel- of dubbelstroomstraalmotoren worden ingebouwd (engels: "pods"). Het betreft hier gondels van civiele vliegtuigen. In een vroeg ontwerpstadium, de z.g. conceptuele fase, ontbreken vaak bepaalde essentiële gegevens, zoals installatie tekeningen, welke nodig zijn voor een nauwkeurige bepaling van het gondeloppervlak. Soms zijn alleen elementaire gegevens, zoals de startstuwkracht (T_{to}), de omloopverhouding (λ) en de lucht-massastroom (m_a) bekend. In zulke gevallen kan uiteraard het gondeloppervlak slechts bij benadering worden berekend, waarbij een standaardafwijking in de orde van 10 % acceptabel is.

Behalve het gondeloppervlak zijn ook kenmerkende gondelafmetingen, zoals in- en uitlaatdiameters en lengte van belang.

In dit memorandum is een aantal uitdrukkingen afgeleid voor het gondeloppervlak, gebruikmakend van gegevens van gondels, waarvan de geometrie redelijk nauwkeurig bekend is, hetzij doordat de motoren zijn ingebouwd in bestaande vliegtuigtypen, hetzij doordat de motorfabrikant representatieve gondels heeft weergegeven in de motorbrochures. Met behulp van in lit. 1 gepresenteerde uitdrukkingen zijn deze oppervlakken zo nauwkeurig mogelijk berekend. De hierbij gevonden gegevens dienen als verificatiemateriaal voor de later te ontwikkelen meer algemeen bruikbare formules. Aangezien essentiële afmetingen zoals de inlaatdiameter van de motor en de gondellengte niet altijd bekend zijn, is het noodzakelijk deze eveneens te refereren aan prestatiegrootheden zoals de omloopverhouding en de stuwkracht of de massastroom van de lucht. Door het invoeren van (semi-) statische verbanden kunnen dan een aantal betrekkingen worden afgeleid, welke berekening van het oppervlak mogelijk maken afhankelijk van de beschikbare gegevens. In de afleiding wordt zo mogelijk de standaardspread van de gevonden formule vermeld. Bij een te klein aantal punten zal de figuur een indicatie geven over de (on)nauwkeurigheid van de gevonden uitdrukking.

Behalve voor het gondeloppervlak zijn ook algemeen bruikbare resultaten gevonden voor het inlaattooppervlak van de motor, de statische stuwkracht als functie van de massastroom en de invloed van de turbine-inlaattertemperatuur daarop, evenals voor het benodigde oppervlak van de fangondel-uitlaat en de gasgenerator uitlaat. Al deze gegevens kunnen worden gebruikt voor een eerste schatting van de gondelgeometrie.

2. Klassificering van de motorinstallaties.

Als verificatiemateriaal zijn de omspoelde gondeloppervlakken bepaald voor een 35-tal in bestaande vliegtuigen of vliegtuigprojecten ingebouwde turbomotoren, dan wel voor gondels welke door de motorfabrikant zijn toegepast ter bepaling van de prestaties. In het algemeen betreffen de gegevens moderne dubbelstroomstraalmotoren, maar om het effect van o.m. de omloopverhouding na te gaan, zijn ook enkele (inmiddels verouderde) enkelstroomstraalmotoren beschouwd (Rolls Royce Viper, General Electric CJ 805 en Rolls Royce Avon), alsmede enkele motoren met een lage omloopverhouding (z.g. "low-bypass" motoren, zoals de Rolls Royce Conway, de Pratt and Whitney JT 3 D en de Rolls Royce RB.163 Spey). Daarbij moet in het oog worden gehouden dat een bepaald type motor in verschillende vliegtuigen vaak ook in verschillende typen gondels is ingebouwd. Daarbij komen soms vrij aanzienlijke verschillen in gondeloppervlak naar voren als gevolg van aspecten waaraan in het volgende aandacht zal worden gegeven. De oorzaak van de verschillen is soms echter nauwelijks te achterhalen; het is dan ook zeker dat de voorliggende methodiek een onnauwkeurigheid van tenminste 5 á 10 % zal houden.

Het blijkt noodzakelijk een drietal vormen van installaties te onderscheiden (zie Fig. 1), hierna aangeduid als Kategorie A, B en C, resp.:

Kategorie A: enkelstroomstraalmotoren, ingebouwd in een eenvoudige type gondel, veelal voorzien van een straalomkeermecanisme dan wel een geluiddemper. Hoewel dit type motor thans verouderd is, wordt het toch in de statistiek opgenomen, zij het als afzonderlijke categorie.

Kategorie B: dubbelstroomstraalmotoren, welke zijn ingebouwd in een lange gondel ("full-length cowl"). Vaak worden de koude en hete uitlaatgassen gemengd. Daardoor wordt een verlaging van het specifiek brandstofverbruik verkregen. Hierbij is een verlenging van de gondel te verwachten. Meestal is ook een straalomkeermecanisme geïnstalleerd.

Kategorie C: dubbelstroomstraalmotoren, waarvan de fan-gondel korter is dan de totale motorlengte ("part-length cowl"). De gasgenerator-gondel wordt omspoeld door de uitlaatstraal van de fan; het deel van het oppervlak ervan, dat achter de fan-gondel uitlaat uitsteekt, wordt meegerekend, aangezien dit van

belang is voor de schraapweerstand ("scrubbing drag"). Soms bevindt zich in de uitlaat van de gasgenerator een konus. De fan-gondel is meestal voorzien van een straalomkeermecanisme; de gasgenerator echter niet altijd. Deze bouwwijze leidt ertoe, dat een relatief korte gondel wordt verkregen met een klein omspoeld oppervlak, lage weerstand en gereduceerd gewicht t.o.v. Kategorie B. Zo heeft de korte gondel van de Avco Lycoming ALF 502R (in de BAe 146) een oppervlak van ca. 10,8 m² tegenover 13,7 m² oppervlak van de lange gondel (ALF 502L) van de Canadair Challenger.

3. Berekening van het gondeloppervlak uit installatietekeningen.

De belangrijkste afmetingen van de gondel zijn gedefiniëerd in Fig. 2. Bij Kategorie C wordt een verhoudingsgetal ϕ ingevoerd, gedefiniëerd als:

$$\phi = \frac{\text{lengte fan-gondel}}{\text{lengte fan-gondel} + \text{lengte gasgenerator-gondel}} = \frac{l_f}{l_f + l_g} \quad (1)$$

In het Engels wordt b.v. gesproken over "half-length", "three-quarter length" en "full length" cowls, waarvan resp. $\phi = \frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ en 1. In feite kan ϕ echter elke waarde tussen ongeveer $\frac{1}{3}$ en 1 innemen.

Het oppervlak van de eventuele uitlaatkegel bedraagt i.h.a. 3 á 7 % van het totale gondeloppervlak. Aangezien dit binnen de spreiding van de uitkomsten valt en in het ontwerpstadium vaak niet bekend is of zo'n kegel zichtbaar is, wordt hiermee verder geen rekening gehouden. In de correlatie voor de gondellengte (par. 6) wordt deze kegel echter wel bij de totale gondellengte meege-rekend.

In appendix B van lit. 1 worden de volgende uitdrukkingen gegeven voor het gondeloppervlak:

Fan

$$A_f = l_f D_n \left[2 + 0,35 \beta + 0,80 \beta \frac{D_h}{D_n} + 1,15 (1-\beta) \frac{D_{ef}}{D_n} \right] \quad (2a)$$

Gasgenerator

$$A_g = \pi l_g D_g \left[1 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{eg}}{D_g} \right) \left\{ 1 - 0,18 \left(\frac{D_g}{l_g} \right)^{\frac{5}{3}} \right\} \right] \quad (2b)$$

Het oppervlak van de uitlaatkonus is ongeveer 2,2 maal het product van diameter en lengte van het zichtbare deel.

Vgl. (2) is van toepassing op gondels met een cirkelvormige dwarsdoorsnede. Veel gondels vertonen echter een verdikking ter plaatse van de geïnstalleerde accessoires. In plaats van D_n is dan gebruik gemaakt van een equivalente diameter:

$$D_n = \frac{b_n + h_n}{2} \quad (3)$$

waarbij b_n en h_n de grootste breedte resp. hoogte van de gondel voorstellen (i.h.a. dus van het grootspant).

In sommige motorinstallaties zijn de motoraccessoires in de gasgeneratorgondel ondergebracht, hetgeen leidt tot een kleinere D_n en een kortere fangondel.

De geometrische gegevens van de beschouwde motorgondels en de daaruit m.b.v. (2) berekende oppervlakken zijn weergegeven in Tabel 1. Hierbij moet worden vermeld dat de nauwkeurigheid van de aldus bepaalde oppervlakken in sommige gevallen niet erg groot is*), aangezien gebruik moest worden gemaakt van afbeeldingen op een kleine schaal. Alle hierna genoemde procentuele spreidingen zijn echter ten opzichte van de oppervlakken uit deze tabel gedefiniëerd, aangezien meer nauwkeuriger gegevens ontbreken. De werkelijke afwijkingen zijn dus in principe groter.

Alle beschouwde motoren hebben axiale compressoren, zij het dat deze soms zijn gecombineerd met een centrifugale compressor zoals in de Garret Airesearch TFE 731. Bij dit type is het terugstroomprincipe ("reverse flow") toegepast. Daardoor is de motor relatief kort met een vrij grote inlaat- en gondeldiameter en een grote spinner. De Turboméca Astafan, de Avco Lycoming ALF 502 en het project van Rolls Royce, de RR-410-11 (alias M 45 S-11) zijn met een vertragingmechanisme voor de fan uitgerust. Als gevolg daarvan is de gondel relatief lang.

4. Het gondeloppervlak als functie van de inlaatdiameter.

De maximale gondeldiameter (D_n), de gondellengte (l_n) en het verhoudingsgetal ϕ zijn de belangrijkste kengrootheden die het gondeloppervlak bepalen. Weliswaar spelen de voorrand-diameter (D_h), de uitlaatdiameters (D_{ef} en D_{eg}), de

*) Vermoed wordt, dat de fout gemiddeld 5% bedraagt; soms wel 10%. Deze nauwkeurigheid kan uiteraard niet exact worden bepaald.

gasgenerator diameter (D_g) en de factor β eveneens een rol in de berekening van het oppervlak, maar deze grootheden zijn veelal niet bekend en hebben een geringe invloed. Voor het totale gondeloppervlak (excl. de staartkonus*) wordt nu de volgende uitdrukking gebruikt:

$$A_n = A_f + A_g = A_f \left(1 + \frac{A_g}{A_f} \right) \quad (4)$$

waarbij voor de categorieën A en B uiteraard $\frac{A_g}{A_f} = 0$.

4.1. Het oppervlak A_f bij gegeven inlaatdiameter en gondellengte.

Het oppervlak van de fan-gondel wordt gerelateerd aan de belangrijkste afmetingen:

$$A_f = f_f \pi D_n l_f = f_t \pi D_i l_f \frac{D_n}{D_i} \quad (5)$$

waarbij f_f de verhouding voorstelt van het gondeloppervlak tot het oppervlak van een omschreven cylinder met dezelfde diameter D_n en lengte l_f . Voor de categorieën A en B wordt l_f vervangen door l_n .

Aangezien voor een gegeven motortype de diameter van de inlaat (D_i) vrijwel steeds bekend is, gaat de voorkeur uit naar een statistisch verband voor $\frac{f_f \cdot D_n}{D_i}$.

Gebleken is, dat zowel f_f als $\frac{D_n}{D_i}$ een functie zijn van de lengte/diameter verhouding van de (fan-)gondel en voorts dat bij grote motoren de gondel "strakker" om de motor wordt aangebracht t.g.v. de relatief kleinere accessoires etc.

Dit schaaffect kan in rekening worden gebracht door een effectieve inlaatdiameter te gebruiken die 3 cm groter is dan de feitelijke, onafhankelijk van de grootte van de motor. Uit het beschikbare statistische materiaal is nu de volgende betrekking afgeleid:

$$A_f = \pi l_f (D_i + 0,06 l_f + 0,03) \quad (6)$$

De standaarddeviatie van deze uitdrukking bedraagt 6,5 %.

4.2. De verhouding A/A_f .

Voor de geanalyseerde motorgondels blijkt deze verhouding zeer goed te benaderen

*) In de statistische gegevens is dit oppervlak echter wel meegerekend.

door (Fig. 3):

$$\frac{A_g}{A_f} = 0,9 \frac{l_g D_g}{l_f D_n} = 0,9 \frac{1-\varphi}{\varphi} \frac{D_g}{D_{ef}} \frac{D_{ef}}{D_n} \quad (\varphi > 0) \quad (5)$$

Alleen bij zeer kleine waarden van A_g/A_f is de fout vrij groot, maar de fout in $1 + A_g/A_f$ is desondanks klein. Bij gegeven D_{ef} wordt de gasgeneratordiameter bepaald door het benodigde uitlaatoppervlak A_{ef} :

$$A_{ef} = \frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_g^2) \quad (6)$$

zodat geldt:

$$\frac{D_g}{D_{ef}} = \sqrt{1 - \frac{4}{\pi} \frac{A_{ef}}{D_{ef}^2}} \quad (7)$$

Het oppervlak A_{ef} zal in de volgende paragraaf worden afgeleid uit de lucht-massastroom door de fan (omlooplucht).

De verhouding D_{ef}/D_n in (5) blijkt vooral samen te hangen met φ . Statistisch is gevonden:

$$\frac{D_{ef}}{D_n} = 1 - \frac{1}{3} \varphi^2 \quad (\text{voor } \varphi < 1) \quad (8)$$

Substitutie van (7) en (8) in (5) levert:

$$\frac{A_g}{A_f} = 0,9 \frac{1-\varphi}{\varphi} \left(1 - \frac{1}{3} \varphi^2\right) \sqrt{1 - \frac{4}{\pi} \frac{A_{ef}}{D_{ef}^2}} \quad (9)$$

In deze uitdrukking is de voorwaarde $\varphi < 1$ vervallen omdat voor $\varphi = 1$ geldt $A_g/A_f = 0$.

4.3. Het totale gondeloppervlak A_n .

Substitutie van (9) in (6) levert bij benadering:

$$A_n = \pi l_n (D_i + 0,06 l_n + 0,03) F(\varphi) \quad (10)$$

waarbij $F(\varphi)$ is gedefiniëerd als:

$$F(\varphi) = \frac{1 + 0,06 \varphi \frac{l_n}{D_i}}{1 + 0,06 \frac{l_n}{D_i}} \varphi \left(1 + \frac{A_g}{A_f} \right) \quad (11a)$$

Hierin kan voor A_g/A_f vgl. (9) worden gesubsitueerd. Uit een latere uitwerking zal blijken dat $F(\varphi)$ aanzienlijk te vereenvoudigen is. Hier zal worden volstaan met het weergeven van $F(\varphi)$ voor de motoren, waarvan φ , $\frac{l_n}{D_i}$ en $\frac{A_{ef}}{2 D_{ef}}$ bekend zijn. Fig. 4 laat het resultaat zien, hetwelk goed is te benaderen door:

$$F(\varphi) = \frac{1+\varphi}{2} \quad (11b)$$

Gesubstitueerd in (10) levert dit:

$$A_n = \pi l_n (D_i + 0,06 l_n + 0,03) \frac{1+\varphi}{2} \quad (m) \quad (12a)$$

of:

$$A_n = \pi \frac{l_n + l_f}{2} (D_i + 0,06 l_n + 0,03) \quad (m) \quad (12b)$$

Hieruit blijkt dat voor categorie C dus met een algebraïsche gemiddelde van de fan-gondel en de totale gondellengte kan worden gewerkt. Voor de categorieën A en B moet in vlg. (12) uiteraard $\varphi = 1$ en $l_f = l_n$ worden gesteld.

Vlg. (12) is toegepast op alle beschouwde motoren en leverde een standaarddeviatie op van 6,7 %.

5. Berekening van de inlaatdiameter D_i .

In bepaalde ontwerpstudies wordt niet van een gegeven motortype gebruik gemaakt, maar zijn van de motor(en) slechts de stuwkracht, de omloopverhouding, de doorstromende luchtmassa (m_a per tijdseenheid) bekend. In dat geval kan D_i worden gerelateerd aan m_a :

$$m_a = \rho_i v_i A_i \quad (13)$$

waarin de index i de inlaat van de fan (compressor) aanduidt. Indien in de start (snelheid 0) de stroming in de inlaat isentropisch wordt verondersteld kan op elementaire wijze worden afgeleid:

$$\frac{m_a}{\rho_o a_o} = \frac{M_i}{(1 + 0,2 M_i^2)^3} \frac{\pi}{4} (D_i^2 - D_s^2) \quad (14)$$

Het getal van Mach in de inlaat M_i is een gemiddelde waarde, rekening houdend met niet-uniformiteiten in de stroming. M_i varieert tussen ca. 0,50 en 0,60 (zie fig. 5^a) met bij kleine motoren overwegend de lagere waarden. Wanneer in plaats van A_i een effectief oppervlak wordt gebruikt, dat ca. $0,01 \text{ m}^2$ kleiner is dan A_i , blijkt M_i een vrijwel konstante waarde van ongeveer 0,56 te hebben (fig. 5b). (Deze conclusie stemt overeen met ref. 4) Met deze gegevens wordt uit (14) afgeleid:

$$D_i = 1,65 \sqrt{\frac{\frac{m_a}{\rho_o a_o} + 0,0050}{1 - \left(\frac{D_s}{D_i}\right)^2}} \quad (m) \quad (15)$$

De verhouding (D_s/D_i) ("hub/tip" ratio) is voornamelijk afhankelijk van de bouwwijze van de motor en varieert tussen ca. 0,25 en 0,50, met 0,4 als gemiddelde waarde (zie ook ref. 4). De hoge waarde rond ca. 0,50 komt veelal door de aanwezigheid van een vertragsmechanisme t.b.v. de fan. Daarnaast kan echter opgemerkt worden, dat D_s/D_i relatief groot is voor kleine motoren en bij hoge omloopverhoudingen. Uit de gegevens van de motoren is statistisch afgeleid:

$$\left(\frac{D_s}{D_i}\right)^2 \approx 0,05 \left[1 + 0,1 \frac{\rho_o a_o}{m_a} + \frac{3\lambda}{1+\lambda} \right] \quad (16)$$

waarin de omloopverhouding is gedefiniëerd als:

$$\lambda = \frac{\text{luchtmassastroom door de fan}}{\text{luchtmassastroom door de generator}} \quad (17)$$

De nauwkeurigheid van (16) is niet groot, maar de fout heeft op D_i slechts een gering effect. De standaardspreading van (15) is in combinatie met (16) 6,7 %.

6. De gondellengte l_n .

De correctie tussen de gondellengte en de doorstromende luchtmassa blijkt veel minder duidelijk dan die tussen de inlaatdiameter en m_a . De volgende redenen kunnen hiervoor worden aangevoerd.

- a) De lengte van de gasgenerator hangt direkt samen met de hierdoor stromende luchtmassa en in veel mindere mate met de massa van de omlooplucht. Met toenemende omloopverhouding neemt de gondellengte niettemin toe omdat de turbine meer arbeid moet opnemen en dus langer wordt, en voorts omdat de fan zelf groter wordt en meer lengte inneemt.
- b) De motorlengte neemt toe met de totale drukverhouding. Indien een hoge drukverhouding het aanbrengen van z.g. "inlet guide vanes" voor de compressor nodig maakt neemt de motorlengte nog extra toe (met ca. 4 %, zie lit. 2).
- c) Motoren met een afwijkende configuratie, zoals "three-spool engines" (Rolls Royce RB 211) of "reverse flow engines" kunnen met een relatief korte gasgenerator volstaan.
- d) De aanwezigheid van een stuwstraal-omkeerinstallatie of een mengzône zal de gondellengte doen toenemen. Dit is ook het geval met voorzieningen ter onderdrukking van de geluidsuitstraling.
- e) Motoren met een uitlaatkonus hebben vaak een relatief korte gasgenerator-gondel.
- f) Verschillen in motorlengte kunnen veelal ook worden verklaard uit verschillen in de stand van de techniek. Zo laat fig. 6 een vergelijking zien van twee uitvoeringen van de General Electric CF-6 dubbelstroomstraalmotor, waarbij door een verbeterde uitvoering van voornamelijk de verbrandingskamer een verkorting met 9,2 % van de motorlengte (van flens tot flens) wordt verkregen. Overigens is een dergelijke verkorting niet altijd terug te vinden in een verkorting van de gondel.

6.1. De totale gondellengte l_n .

Wanneer de gondellengte evenredig met een kenmerkende diameter van de gasgenerator (compressor) wordt verondersteld, dan is l_n evenredig met $\sqrt{\frac{m_a}{1+\lambda}}$. Gebleken is, dat hieruit een onderschatting volgt van de motorlengte. Een beter resultaat wordt verkregen, wanneer ook de omlooplucht voor ca. 20 % wordt meegerekend, zodat l_n een functie is van

$$m'_a = \frac{m_a}{1+\lambda} + 0,20 \frac{\lambda}{1+\lambda} m_a = m_a \frac{1 + 0,20\lambda}{1+\lambda}$$

In fig. 7 is voor de categorieën A, B en C een afzonderlijke correlatie gegeven tussen l_n en $\sqrt{m'_a}$. Het resultaat is als volgt:

$$l_n = C_1 \left(\sqrt{\frac{m_a}{\rho_o a_o} \frac{1 + 0,2\lambda}{1+\lambda}} + \Delta l \right) \quad (18)$$

waarbij voor de verschillende motortypen geldt:

Kategorie A (enkelstroomstraalmotoren, $\lambda = 0$): $C_1 = 12,0$, $\Delta l = 0$.

Kategorie B (dubbelstroomstraalmotoren, $\varphi = 1$): $C_1 = 9,8$, $\Delta l = 0,05$ m.

Kategorie C (dubbelstroomstraalmotoren, $\varphi < 1$): $C_1 = 7,8$, $\Delta l = 0,10$ m.

Voor kat. A is de standaardspreading niet berekend wegens het beperkte aantal motoren. Voor B en C bedraagt deze 11,2 % resp. 11,7 %.

Fig. 7 geeft aan, dat grote afwijkingen optreden bij de volgende motortypen:

- a) De Rolls Royce RB.211-524: Deze geavanceerde motor heeft een gasgenerator met drie assen ("three-spool engine") met een verkorte verbrandingskamer en is daardoor relatief kort.
- b) De Pratt & Whitney JT-8D-209: De uitlaat van deze motor, ingebouwd in de McDonnell Douglas DC-9-srs80, is verlengd omdat er extra oppervlak is gecreëerd voor het aanbrengen van geluiddempend materiaal.
- c) De Rolls Royce RB 410 (project): is een speciale motor met zeer hoge omloopverhouding ($\lambda = 9,8$), ontwikkeld uit de M 45 H en uitgerust met fan vertragen ("geared fan"). Daarbij is zeer veel geluiddempend materiaal aangebracht in de in- en uitlaat. De gondel is daardoor relatief lang.

6.2. Invloed van de gondellengte-verhouding φ .

In par. 4.3. werd de functie $F(\varphi)$ gedefiniëerd door vgl. (11). Deze wordt nu als volgt verder ontwikkeld.

a. De verhouding l_n/D_i is voor kat. C bij benadering:

$$\frac{l_n}{D_i} \approx 6 \sqrt{\frac{1 + 0,2\lambda}{1+\lambda}} \quad (19)$$

b. Wanneer op analoge wijze als in par. 5 het fan-uitstroomoppervlak A_{ef} statistisch wordt gecorrelleerd aan de massastroom van de omlooplucht, dan blijkt in goede benadering:

$$\frac{m_a}{a_o \rho_o} \frac{\lambda}{1+\lambda} = 0,7 A_{ef} \quad (20)$$

Dit resultaat duidt erop dat voor de geanalyseerde motoren de uitstroomsnelheid in de fanuitlaat nagenoeg constant is. Inderdaad blijkt deze in de praktijk ongeveer 300 m/s te bedragen.

Substitutie van (19) en (20) in (11) levert:

$$F(\varphi) = \frac{0,36 \varphi \sqrt{1 + 0,2\lambda} + \sqrt{1 + \lambda}}{0,36 \sqrt{1 + 0,2\lambda} + \sqrt{1 + \lambda}} \left[\varphi + 0,9(1-\varphi) \left(1 - \frac{1}{3}\varphi^2\right) \sqrt{\frac{1 + 0,45\lambda}{1 + \lambda}} \right] \quad (21)$$

In fig. 4 is $F(\varphi)$ volgens deze uitdrukking weergegeven als functie van de omloopverhouding en vergeleken met het statistisch materiaal en met de eerder voorgestelde benadering $F(\varphi) = \frac{1}{2} (1+\varphi)$. De invloed van de omloopverhouding blijkt voor $\lambda > 2$ verwaarloosbaar te zijn, zodat toepassing van de sterk vereenvoudigde uitdrukking gerechtvaardigd is.

In plaats van de factor φ kan ook de verhouding l_f/D_i als parameter worden ingevoerd, zodat geldt:

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_f/D_i}{l_n/D_i} \right) \quad (22)$$

Substitutie van (19) voor de verkorte fangondel levert dan:

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{l_f}{D_i} \sqrt{\frac{1 + \lambda}{1 + 0,20 \lambda}} \right) \leq 1 \quad (23)$$

De verhouding l_f/D_i blijkt minimaal 1,2 te zijn; bij $l_n/D_i = 3,5$ wordt dan $F(\varphi) = 0,67$, zodat het gondeloppervlak slechts 67 % bedraagt van de waarde voor een volledig doorgetrokken fangondel. Een zo korte fangondel is echter alleen mogelijk, wanneer er geen straalomkering is en de motoraccessoires in de gasgeneratorgondel zijn gemonteerd. Een meer gebruikelijke waarde is $l_f/D_i = 1,6$ ($F(\varphi) = 0,73$), terwijl voor motoren met veel materiaal voor geluiddemping $l_f/D_i \approx 2$ à $2,5$ ($F(\varphi) = 0,79$ à $0,86$).

Vergelijking (23) laat ook zien, dat de oppervlaktereductie groter is naarmate de omloopverhouding toeneemt.

7. Gondeloppervlak als functie van de luchtmassastroom.

De in par. 5 en 6 afgeleide uitdrukkingen voor de inlaatdiameter en de gondellengte kunnen worden gesubstitueerd in (12). Bij uitwerking ontstaan ingewikkelde vergelijkingen, welke echter na reeksontwikkeling en verwaarlozing van 2^e orde correctietermen aanzienlijk vereenvoudigd kunnen worden. Het resultaat wordt, na bijstelling van de konstanten, geschreven als functie van de volgende parameters:

$$\mu = \frac{m_a}{\rho_o a_o} \quad ; \quad \Lambda = \sqrt{\frac{1 + 0,2 \lambda}{1 + \lambda}}$$

We vinden dan voor:

Kategorie A: ($\lambda = 0, \varphi = 1$):

$$A_n = 91 (\mu + 0,0125 \sqrt{\mu} + 0,0036) \approx 92 \mu^{0,94} \text{ (m}^2\text{)} \quad (24a)$$

(voor $\mu > 0,1$)

Kategorie B: ($\varphi = 1$)

$$A_n = 52,1 (\mu \Lambda + 0,10 \sqrt{\mu}) (1 + 0,3 \Lambda) \text{ (m}^2\text{)} \quad (24b)$$

Kategorie C:

$$A_n = 41,5 F(\varphi) (\mu \Lambda + 0,14 \sqrt{\mu}) (1 + 0,3 \Lambda) \text{ (m}^2\text{)} \quad (24c)$$

$$\text{met } F(\varphi) = \frac{1+\varphi}{2} \text{ (gegeven } \varphi) \quad (24c-1)$$

$$\text{of } F(\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_f/D_i}{6\Lambda} \right) \text{ (gegeven } l_f/D_i) \quad (24c-2)$$

zie fig. 4

De standaardspreading van (24a) is niet berekend vanwege het geringe aantal motoren. Die van (24b) en (24c) bedraagt 10,1 % resp. 11,4 % (geg φ) cq. 8,1 % (geg l_f/D_i).

Worden de eerder genoemde afwijkende motortypen (RB.211-524, JT8D-209 en RB 410) echter niet meegerekend, dan is de standaardspreading 9,5 % resp. 10,2 % (geg φ) cq. 6,8 % (geg l_f/D_i).

Aan gebruik van vgl. (24c-2) dient de voorkeur te worden gegeven, tenzij bij ontwerpstudies gebruik van een constante φ wordt voorgeschreven.

8. Het gondeloppervlak als functie van de startstuwkracht

Bij het voorontwerp van vliegtuigen is de statische stuwkracht op zeeniveau T_{to} een belangrijke grootte. Indien niet het motortype, doch uitsluitend T_{to} en de omloopverhouding zijn gespecificeerd, dan is het voor de berekening van het gondeloppervlak nodig eerst de luchtmassastroom te bepalen. Eliminatie leidt dan tot uitdrukkingen waarin alleen T_{to} en λ voorkomen, welke zo nodig verder vereenvoudigd kunnen worden indien de vereiste nauwkeurigheid minder hoog is.

8.1. Verband tussen stuwkracht en luchtmassastroom.

In lit. 1 Appendix H wordt de volgende uitdrukking gegeven voor de statische specifieke stuwkracht van turbomotoren:

$$\frac{T}{m_a} = a \frac{\sqrt{5\eta_n G(1 + \eta_{tf} \lambda)}}{1 + \lambda} \quad (M = 0) \quad (25)$$

Hierin stellen η_n het uitlaatrendement van de fangondel, η_{tf} het produkt van turbine- en fanrendement en G een specifiek gasgenerator-vermogen voor. Indien $\eta_{tf} = 0,75$ wordt gesteld, kan (25) worden herleid tot:

$$\frac{T_{to}}{p_o} = \gamma \frac{m_o}{\rho_o a_o} \cdot \frac{\sqrt{5\eta_n G(1 + 0,75 \lambda)}}{1 + \lambda} \quad (\gamma = 1,4, M = 0) \quad (26)$$

Uit deze vergelijking volgt de uitdrukking voor de effectieve gasgenerator-functie:

$$\bar{G} = \eta_n G = \frac{(1 + \lambda)^2}{(1 + 0,75 \lambda)} \left(\frac{133.161}{m_a} \frac{T_{to}}{p_o} \right)^2 \quad (26a)$$

De gasgeneratorfunctie hangt in hoofdzaak af van de turbineinlaat temperatuur T_{t4} en in mindere mate van de totale compressie-einddrukverhouding van fan en compressor samen. Appendix H van lit. 1 geeft hiervoor een berekeningsmethode. Bij benadering wordt hiermee voor normale compressor-drukverhoudingen gevonden:

$$G \approx \left(\frac{T_{t4}}{600} - 1,25 \right) \quad (M = 0) \quad (27)$$

De technisch mogelijke waarden van T_{t4} , behorende bij een bepaalde stand van de techniek, is in principe bekend.

Het is echter interessant na te gaan, welke waarden bij benadering zijn toegepast bij de motortypen waarvoor de gondels zijn geanalyseerd. Daartoe is voor deze motoren uit de bekende statische stuwkracht en de luchtmassastroom met behulp van (26a) de waarde voor $\eta_n G$ berekend en weergegeven in fig. 8. (Hiervoor zijn de relevante gegevens van aanzienlijk meer motoren beschikbaar en gebruikt, o.a. uit ref. 5.) Tevens is in deze figuur de turbine-inlaattemperatuur volgens (27) aangegeven ($\eta_n = 0,97$).

Fig. 8 geeft de aanwijzing dat bij de grootste turbofans in de categorie van 10 tot 20 ton stuwkracht ($T_{to}/p_o = 1 \text{ à } 2$) de maximaal toegepaste T_{t4} in de start ongeveer 1600 à 1650 K bedraagt; een waarde die overeenstemt met opgaven van de motorfabrikanten. De groep turbofans met een stuwkracht van 2 à 3,5 ton heeft een T_{t4} van ca. 1350 K, de oudere typen enkelstroom- en dubbelstroomstraalmotoren ($\lambda = 0,5 \text{ à } 1,0$) werken bij een T_{t4} van ca. 1200 K. Daarbij moet worden bedacht, dat de rendementen van de motorkomponenten eveneens lager zijn naarmate de motor kleiner is.

Wanneer T_{t4} niet als bekend kan worden verondersteld, is het mogelijk uit fig. 8 een zuiver statistische trend af te leiden:

$$\begin{aligned} \text{enkelstroomstraalmotoren} &: \eta_n G \approx 2/3 \quad (\text{geen turbinebladkoeling}) \\ \text{dubbelstroomstraalmotoren} &: \eta_n G \approx 1.1 \left[(1 + \lambda)^{1/4} \left(\frac{T_{to}}{p_o} \right) \right]^{1/6} \end{aligned} \quad (28)$$

De massastroom door de motor kan dan worden berekend volgens (28), of afgelezen uit fig. 9.

8.2. Bepaling van het gondeloppervlak uit T_{to} en G.

Uit (26) volgt voor $\eta_n = 0,96$ de massastroom:

$$\mu = \frac{m_a}{\rho_o a_o} = 0,326 \frac{T_{to}/p_o}{\sqrt{G}} \frac{1 + \lambda}{\sqrt{1 + 0,75 \lambda}} \quad (29)$$

Substitutie in de vergelijkingen (23) t/m (25) levert de hierna volgende uitdrukkingen van het gondeloppervlak als functie van de stuwkracht, de omloopverhouding en G (zie fig. 10).

Kategorie A (enkelstroomstraalmotoren, zij het verouderd)

Het resultaat is:

$$A_n = 32 \left[\frac{T_{to}/P_o}{\sqrt{G}} \right]^{0,94} \quad (30a)$$

Hierbij kan G worden benaderd door (27) of (28).

Kategorie B

Substitutie in (24b) levert een uitdrukking, die goed kan worden benaderd door het eenvoudige verband,

$$A_n = 25 \left[(1 + \lambda)^{\frac{1}{4}} \frac{T_{to}/P_o}{\sqrt{G}} \right]^{0,86} \quad (30b)$$

dat wordt verkregen door de exacte uitdrukking op dubbellogaritmisch papier weer te geven en vervolgens te lineariseren.

Kategorie C

Op analoge wijze wordt verkregen:

$$A_n = 22,5 F(\varphi) \left[(1 + \lambda)^{\frac{1}{4}} \frac{T_{to}/P_o}{\sqrt{G}} \right]^{0,86} \quad (30c)$$

waarbij voor gegeven φ : $F(\varphi) = \frac{1+\varphi}{2}$

$$\text{gegeven } \frac{l_f}{D_i} : F(\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1 + \lambda}{1 + 0,2 \lambda}} \frac{l_f}{D_i} \right) \leq 1$$

(zie fig. 4 voor $F(\varphi)$).

8.3. Grovere benaderingen.

Wanneer T_{t4} of G niet expliciet bekend zijn, kunnen de door (28) gegeven waarden worden gesubstitueerd in (30) t/m (32). De volgende resultaten worden dan gevonden:

Kategorie A

$$\frac{A_n P_o}{T_{to}} = 38,0 (T_{to}/P_o)^{-0,06} \quad (\text{verouderd}) \quad (31a)$$

Kategorie B

$$\frac{A_n \cdot p_o}{T_{to}} = 24,5 \left(\frac{T_{to}/p_o}{1 + \lambda} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (31b)$$

Kategorie C

$$\frac{A_n \cdot p_o}{T_{to}} \approx 21,6 F(\varphi) \left(\frac{T_{to}/p_o}{1 + \lambda} \right)^{-0,22} \quad (31c)$$

In fig. 11 is met bovenstaande uitdrukkingen de verhouding $\frac{A_n \cdot p_o}{T_{to}}$ weergegeven als functie van de grootte $\frac{T_{to}/p_o}{1 + \lambda}$.

Deze figuur kan direkt worden gebruikt om A_n af te lezen voor gegeven stuwkracht en omloopverhouding.

Als samenvatting is tenslotte nog $A_n/F(\varphi)$ uitgezet tegen de voor de omloopverhouding gecorrigeerde stuwkracht (fig. 12). Hierin is $F(\varphi)$ bepaald voor een gemiddelde $\lambda = 5$, zodat

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 + 0,3 \frac{l_f}{D_i} \right) \quad (\text{kategorie C}) \quad (32)$$

terwijl $F(\varphi) = 1$ voor de categorieën A en B.

Fig. 12 laat zien dat de nauwkeurigheid niet zeer groot is, hetgeen ook niet te verwachten is wanneer de invoervariabelen beperkt blijven tot uitsluitend waarden van λ en T_{to} . Niettemin is er sprake van een bruikbare prediktie methode.

9. Samenvatting van de resultaten

De berekening van het gondeloppervlak kan volgens verschillende methoden worden uitgevoerd. Naarmate het aantal gegevens van de motor en de gondelgeometrie groter is wordt een nauwkeuriger resultaat verkregen.

Tabel 2 geeft een overzicht van de in dit Memorandum afgeleide resultaten.

Afhankelijk van het aantal beschikbare gegevens kan hieruit een geschikte methode worden gekozen. Indien $F(\varphi)$ in de formule voorkomt kan deze worden berekend aan de hand van Fig. 4, vgl. (11) of (23), waarbij ofwel φ , ofwel l_f/D_i worden ingevoerd. Indien geen van beide bekend zijn moet een waarde worden aangenomen, b.v. in overeenstemming met reeds uitgevoerde gondelinstallaties. Niet vermeld in Tabel 2 is de mogelijkheid bij een gegeven motortype het gondeloppervlak zonder meer te schatten aan de hand van Tabel 1.

Wanneer één van bovengenoemde methoden wordt toegepast op een gegeven vliegtuigtype, waarvan de motorstuwkracht wordt geschaald bij konstante thermodynamische eigenschappen ("rubberizing") kan de waarde van A_n/T_{to} als konstant worden beschouwd. Dit hangt samen met het feit dat de exponenten (< 1) in de verschillende formules afkomstig zijn uit hoofdzakelijk statistische verbanden. Alleen wanneer een grote variatie in de stuwkracht wordt beschouwd moet rekening worden gehouden met een afname van A_n/T_{to} met de grootte van de motor (zie fig. 11).

10. Literatuur

1. Torenbeek, E. : "Synthesis of subsonic airplane design", Delft University Press/Martinus Nijhoff, Student edition, 1982.
2. Torenbeek, E. : "The computation of characteristic areas and volumes of major aircraft components in project design". Delft University of Technology, Dept. of Aerospace Engng, Memorandum M-189, Feb. 1973.
3. Carr, A.M. : "Estimation of windmilling drag and airflow of turbo-jet and turbo-fan engines". Draft Data Item, ESDU P 193C, 22nd May 1981.
4. Gerend, R.P. and Roundhill, J.P. : "Correlation of gas turbine engine weights and dimensions" AIAA Paper No. 70-669, June 1970.
5. J.W.R. Taylor (ed.) : "Jane's All the World's Aircraft 1980-'81" Macdonald and Jane's Publishers Ltd., London.

TABEL I: ALGEMENE GEGEVENS EN GEGEVENS VAN DE GONDELGEOMETRIE VAN STRAALMOTOREN (BEGIN)

Fabrikant	Motor-type	T_{to} (kN)	m_a (kg. s ⁻¹)	λ -	D_i (m)	D_s/D_i -	A_i (m ²)
General Electric	CJ-610	13,1 ³	20,0	0	0,419	0,320	0,124
Pratt & Whitney	JT-12-A8	14,7	23,5	0	0,500	0,456	0,156
Rolls Royce	Viper Mk520	15,0	23,9	0	0,490	0,460	0,149
Rolls Royce	Avon Mk522	46,7	77,3	0	0,800	0,441	0,405
General Electric	CJ-805	49,8	77,1	0	0,767	0,322	0,414
Pratt & Whitney	JT-15D 1	9,8	34,0	3,3	0,533	0,400	0,187
Cornet Air Research	TFE-731-3	15,6	54,4	2,8	0,716	0,520	0,294
General Electric	CF-700 2D	20,0	64,9	1,6	0,803	0,515	0,372
Rolls Royce	RB 401.07	24,0	82,5	4,2	0,823	0,453	0,423
Avco Lycoming	ALF 502L	33,4	116,1	5,0	1,023	0,440	0,663
Rolls Royce	RB.183	43,8	91,0	1,0	0,824	0,301	0,485
Rolls Royce	RB163	50,7	93,5	0,6	0,824	0,301	0,485
Pratt & Whitney	JT8D-5	62,3	143,3	1,1	1,029	0,314	0,750
Rolls Royce	Conway Mk509	77,9	127,0	0,3	0,950	0,276	0,655
Rolls Royce	RB 432.01/03	79,4	249,9	4,7	1,384	0,460	1,186
Pratt & Whitney	JT8D-209	82,3	213,0	1,8	1,245	0,323	1,099
Rolls Royce	RB 432.05	84,5	279,5	4,7	1,486	0,462	1,364
CFM International	CFM 56-2	106,8	376,0	6,0	1,725	0,420	1,947
Turboméca	Astafan II	6,98	31,0	7,7	0,563	0,535	0,178
Turboméca	Astafan IV	9,34	39,0	7,0	0,620	0,500	0,226
Avco Lycoming	ALF 502 R-6	29,8	116,0	5,9	1,023	0,440	0,663
Rolls Royce	M45 M-C	34,3	105,1	2,8	0,876	0,390	0,511
General Electric	CF-34-1A	35,6	139,0	6,3	1,130	0,474	0,778
Rolls Royce	RB.410-11	63,9	311,3	9,8	1,616	0,475	1,588
Rolls Royce	RB 432.01/02	79,4	249,9	4,7	1,384	0,460	1,186
Pratt & Whitney	JT3D-3	80,1	204,1	1,4	1,290	0,342	1,154
Rolls Royce	RB 432.05	84,5	279,5	4,7	1,486	0,462	1,364
CFM International	CFM 56-3	89,0	297,1	5,0	1,524	0,412	1,515
Rolls Royce	RB211-535C	166,4	499,0	4,4	1,877	0,360	2,408
Rolls Royce	RB211-22	180,4	601,0	4,8	2,172	0,330	3,302
General Electric	CF 6-80A	213,5	650,0	4,7	2,195	0,379	3,241
General Electric	CF 6-80A-1	213,5	650,0	4,7	2,195	0,381	3,235
Pratt & Whitney	JT-9D7R4D	213,5	698,0	5,2	2,340	0,370	3,712
General Electric	CF6-50A	215,7	656,8	4,4	2,195	0,413	3,139
Rolls Royce	RB.211-524B	222,5	657,7	4,4	2,182	0,370	3,227

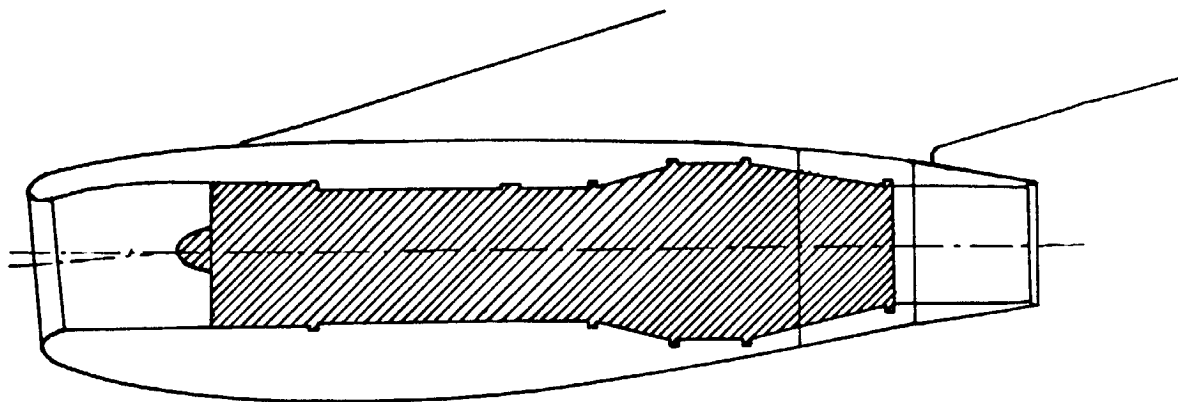
TABEL I: ALGEMENE GEGEVENS EN GEGEVENS VAN DE SONDELGEOMETRIE VAN STRAALMOTOREN (VERVOLG)

Fabrikant	Motortype	D_h (m)	\bar{D}_h (m)	D_{ef} (m)	β -	l_f (m)	A_f (m ²)	A_{ef} (m ²)	D_g (m)	D_{eg} (m)	l (m)
General Electric	CJ-610	0,46	0,73	0,365	0,45	2,50	4,94	0,105	-	-	-
Pratt & Whitney	JT-12-AB	0,53	0,82	0,406	0,37	2,69	6,08	0,131	-	-	-
Rolls Royce	Viper Mk520	0,45	0,86	0,340	0,40	2,90	6,44	0,108	-	-	-
Rolls Royce	Avon Mk522	0,81	1,22	0,582	0,40	5,62	19,44	0,266	-	-	-
General Electric	CJ-905	0,85	1,32	0,714	0,35	5,49	19,35	0,400	-	-	-
Pratt & Whitney	JT-15D 1	0,59	0,90	0,448	0,26	1,99	4,81	0,093	(0,286)	(0,259)	(0,30)
Genet Air Research	TFE-731-3	0,67	1,00	0,537	0,40	2,65	7,13	0,227	-	-	-
General Electric	CF-700 2D	0,71	1,00	0,520	0,35	3,25	8,95	0,264	-	-	-
Rolls Royce	RB 401.07	0,85	1,11	0,641	0,38	3,12	9,58	0,323	-	-	-
Avco Lycoming	ALF 502L	1,02	1,36	0,746	0,30	3,71	13,70	0,437	-	-	-
Rolls Royce	RB 183	0,92	1,25	0,683	0,35	4,22	14,09	0,366	-	-	-
Rolls Royce	RB 163.	0,89	1,31	0,608	0,32	4,43	15,44	0,290	-	-	-
Pratt & Whitney	JT8D-5	1,04	1,47	0,800	0,40	5,13	20,72	0,503	-	-	-
Rolls Royce	Conway Mk509	1,02	1,55	0,712	0,37	5,08	20,93	0,397	-	-	-
Rolls Royce	RB 432.01/03	1,42	1,92	1,071	0,31	3,85	20,26	0,901	-	-	-
Pratt & Whitney	JT8D-209	1,28	1,71	0,960	0,39	6,62	31,27	0,724	-	-	-
Rolls Royce	RB 432.05	1,55	2,04	1,133	0,35	4,76	26,76	1,008	-	-	-
CFM International	CFM 56-2	1,73	2,50	1,505	0,35	4,51	31,17	1,007	-	-	-
Turbomeca	Astafan II	0,56	0,63	0,625	0,20	0,89	1,74	0,110	0,500	0,223	1,0
Turbomeca	Astafan IV	0,63	0,70	0,700	0,20	0,96	2,11	0,189	0,500	0,225	1,2
Avco Lycoming	ALF 502 R-6	1,04	1,42	1,066	0,33	2,25	9,23	0,448	0,758	0,414	0,7
Rolls Royce	M45 H-C	0,93	1,02	1,007	0,55	1,04	3,43	0,262	0,825	0,556	1,2
General Electric	CF-34-1A	1,15	1,40	1,221	0,50	2,14	8,91	0,407	0,986	0,406	1,6
Rolls Royce	RB 410-11	1,57	1,85	1,609	0,42	3,32	12,82	1,090	1,096	0,790	1,3
Rolls Royce	RB 432.01/02	1,44	1,86	1,367	0,37	3,29	17,69	0,646	1,023	0,650	0,7
Pratt & Whitney	JT3D-3	1,13	1,57	1,516	0,75	2,03	9,44	0,584	1,247	0,734	3,1
Rolls Royce	RB 432.05	1,53	2,04	1,403	0,39	3,56	20,72	0,776	0,990	0,613	0,7
CFM International	CFM 56-3	1,56	1,97	1,570	0,43	3,32	19,27	0,773	1,217	0,842	0,8
Rolls Royce	RB 211-535C	1,79	2,50	1,900	0,42	4,05	30,02	1,331	1,384	0,840	1,0
Rolls Royce	RB 211-22	2,22	2,70	2,163	0,45	4,24	33,93	1,952	1,481	0,755	1,7
General Electric	CF 6-80A	2,35	2,77	2,328	0,45	3,82	31,71	1,770	1,857	1,209	2,2
General Electric	CF 6-80A-1	2,41	2,83	2,393	0,45	4,20	35,65	1,629	1,291	1,205	1,7
Pratt & Whitney	JT-9D7R4D	2,30	2,78	2,420	0,45	3,37	22,29	1,995	1,900	0,868	2,7
General Electric	CF 6-50A	2,23	2,96	2,441	0,46	4,22	36,21	1,763	1,927	0,906	2,7
Rolls Royce	RB 211-524B	2,30	2,68	2,062	0,45	4,36	34,45	1,733	1,430	0,903	0,9

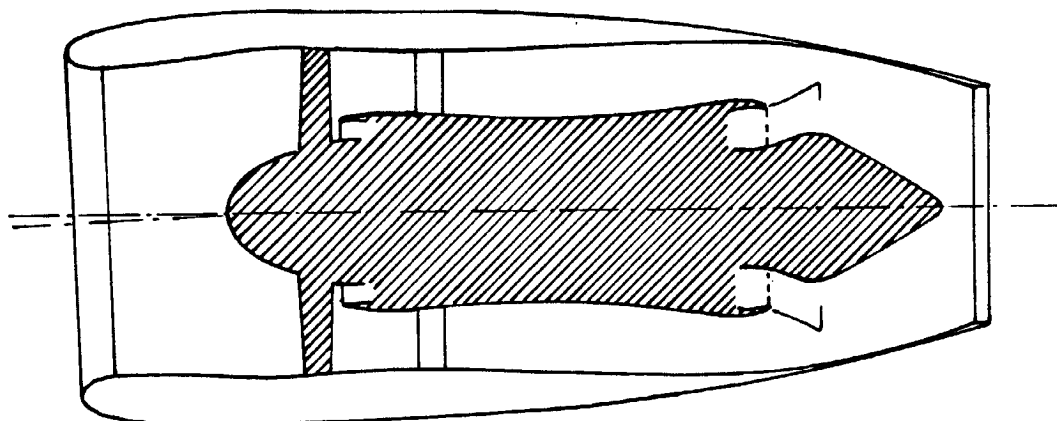
TABEL I: ALGEMENE GEGEVENS EN GEGEVENS VAN DE GONDELGEOMETRIE VAN STRAALMOTOREN (SLOT)

Fabrikant	Motortype	A_g (m ²)	A_{e1} (m ²)	D_c (m)	D_{c1} (m)	A_c (m ²)	g	l_n (m)	A_{tot} (m ²)	Opm.
General Electric	CJ-610	—	—	—	—	—	1	2,50	4,94	Learjet
Pratt & Whitney	JT-12-AP	—	—	—	—	—	1	2,69	6,08	Sabreliner
Rolls Royce	Viper Mk520	—	—	—	—	—	1	2,90	6,44	HS-125
Rolls Royce	Avon Mk522	—	—	—	—	—	1	5,62	19,44	Caravelle
General Electric	CJ-805	—	—	—	—	—	1	5,43	19,35	CV-880
Pratt & Whitney	JT-15D 1	(0,19)	0,053	—	—	—	(0,84)	2,38	5,00	Citation I
Genet Air Research	TFE-731-3	—	—	—	—	—	1	2,65	7,13	RG.
General Electric	CF-700 2D	—	—	—	—	—	1	3,25	8,95	Falcon 20 F
Rolls Royce	RB 401.07	—	—	—	—	—	1	3,12	9,58	project
Avco Lycoming	ALF 502 L	—	—	—	—	—	1	3,71	13,70	Challenger RG
Rolls Royce	RB 183	—	—	—	—	—	1	4,22	14,09	F28 MK 100
Rolls Royce	RB 163.	—	—	—	—	—	1	4,43	15,44	BAC 111-200
Pratt & Whitney	JT8D-5	—	—	—	—	—	1	5,13	20,72	DC-9 s1270
Rolls Royce	Conway Mk509	—	—	—	—	—	1	5,08	20,93	VC-10
Rolls Royce	RB 432.01/03	—	—	—	—	—	1	3,85	20,26	LC. proj.
Pratt & Whitney	JT8D-209	—	—	—	—	—	1	6,62	31,27	DC-9/DC-9-85
Rolls Royce	RB 432.05	—	—	—	—	—	1	4,76	26,76	LC proj.
CFM International	CFM 56-2	—	0,54	0,580	0,71	0,97	1	5,22	32,04	DC 8-70
Turbomeca	Astafan II	1,30	0,039	—	—	—	0,47	1,90	3,04	RG. prot.
Turbomeca	Astafan IV	1,62	0,040	—	—	—	0,43	2,22	3,73	RG. prot.
Avco Lycoming	ALF 502 R-6	1,53	0,135	—	—	—	0,75	2,48	10,76	RG, HS-196
Rolls Royce	M45 H-C	2,92	0,128	0,323	0,58	0,49	0,45	2,87	6,84	VFW-614
General Electric	CF-34-1A	4,10	0,130	—	—	—	0,57	3,79	13,01	Challenger.
Rolls Royce	RB 410-11	4,34	0,271	0,522	0,77	0,89	0,71	5,52	24,11	RG. proj.
Rolls Royce	RB 432.01/02	2,09	0,332	—	—	—	0,82	4,01	19,78	proj.
Pratt & Whitney	JT3D-3	12,53	0,423	—	—	—	0,36	5,72	21,98	AWAC-E3A
Rolls Royce	RB 432.05	2,00	0,295	—	—	—	0,84	4,26	22,72	proj.
CFM International	CFM 56-3	2,73	0,404	0,452	0,86	0,86	0,79	5,05	22,86	B737-300
Rolls Royce	RB 211-535C	3,98	0,554	—	—	—	0,80	5,09	34,00	B.757
Rolls Royce	RB 211-22	7,13	0,448	—	—	—	0,70	6,03	41,06	B-1011
General Electric	CF 6-80A	11,79	0,649	0,797	0,91	1,60	0,65	6,98	45,10	prot.
General Electric	CF 6-80A-1	9,28	0,545	0,871	1,05	2,01	0,55	6,98	46,94	prot.
Pratt & Whitney	JT-9D7R4D	13,09	0,592	—	—	—	0,55	6,15	42,18	B.747
General Electric	CF 6-50A	13,62	0,644	—	—	—	0,61	6,93	50,43	DC-10
Rolls Royce	RB.211-524B	3,72	0,640	—	—	—	0,83	5,25	38,17	B.747

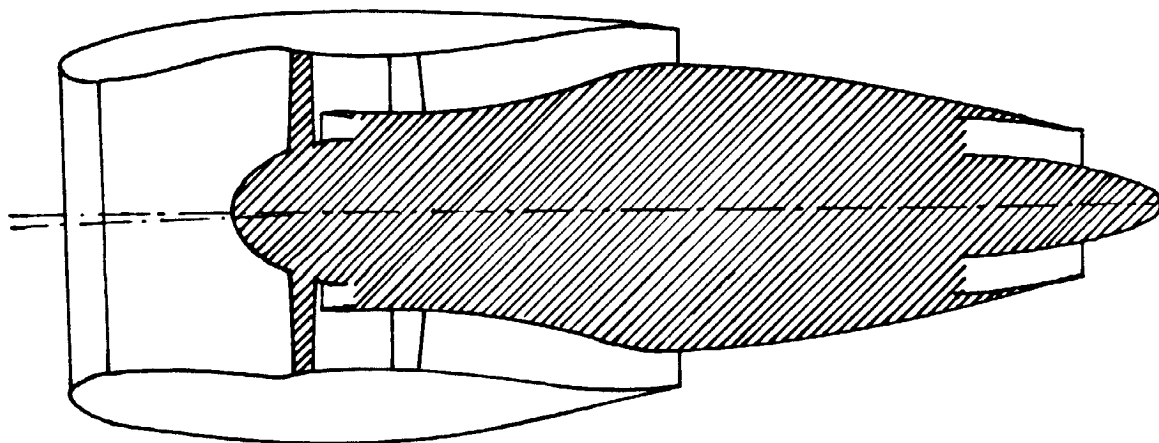
RG = reduction gear



Kategorie A: Enkelstroomstraalmotoren.



Kategorie B: Dubbelstroomstraalmotoren met lange fan-gondel.



Kategorie C: Dubbelstroomstraalmotoren met verkorte fan-gondel.

Fig.1: Klassifikatie van straalmotorgondels

Gegevens	Rekenmethode (Vergelijking no. in tekst)
Motortype (afmetingen) Gondelafmetingen	A_f : (2a) A_g : (2b) $A_n = A_f + A_g$
Motorinlaatdiameter (D_i) Gondellengte (l_n)	A_n { gegeven $\varphi = l_f/l_n$: (12a) { gegeven l_n : (12b)
$\varphi = l_f/l_n$	$F(\varphi) = \frac{1+\varphi}{2}$ (11)
l_f/D_i	$F(\varphi) :$ (23)
} zie ook Fig. 4	
Motor-massastroom (m_a) Omloopverhouding (λ) $F(\varphi)$	D_i : (15) en (16) l_n : (18) A_n : (24)
Motorstuwkracht (T_{to}) Omloopverhouding (λ) Turbine-temp (T_{t4}) $F(\varphi)$	G : (27) m_a : (29) A_n : (24) via m_a A_n : (30) direct
Motorstuwkracht (T_{to}) Omloopverhouding (λ) $F(\varphi)$	G : (28) - statistisch m_a : (29) A_n : (24) - via m_a A_n : (31), Fig. 11 of Fig. 12 - direct

Tabel 2: Samenvatting van resultaten voor de berekening van gondeloppervlakken en diverse andere grootheden.

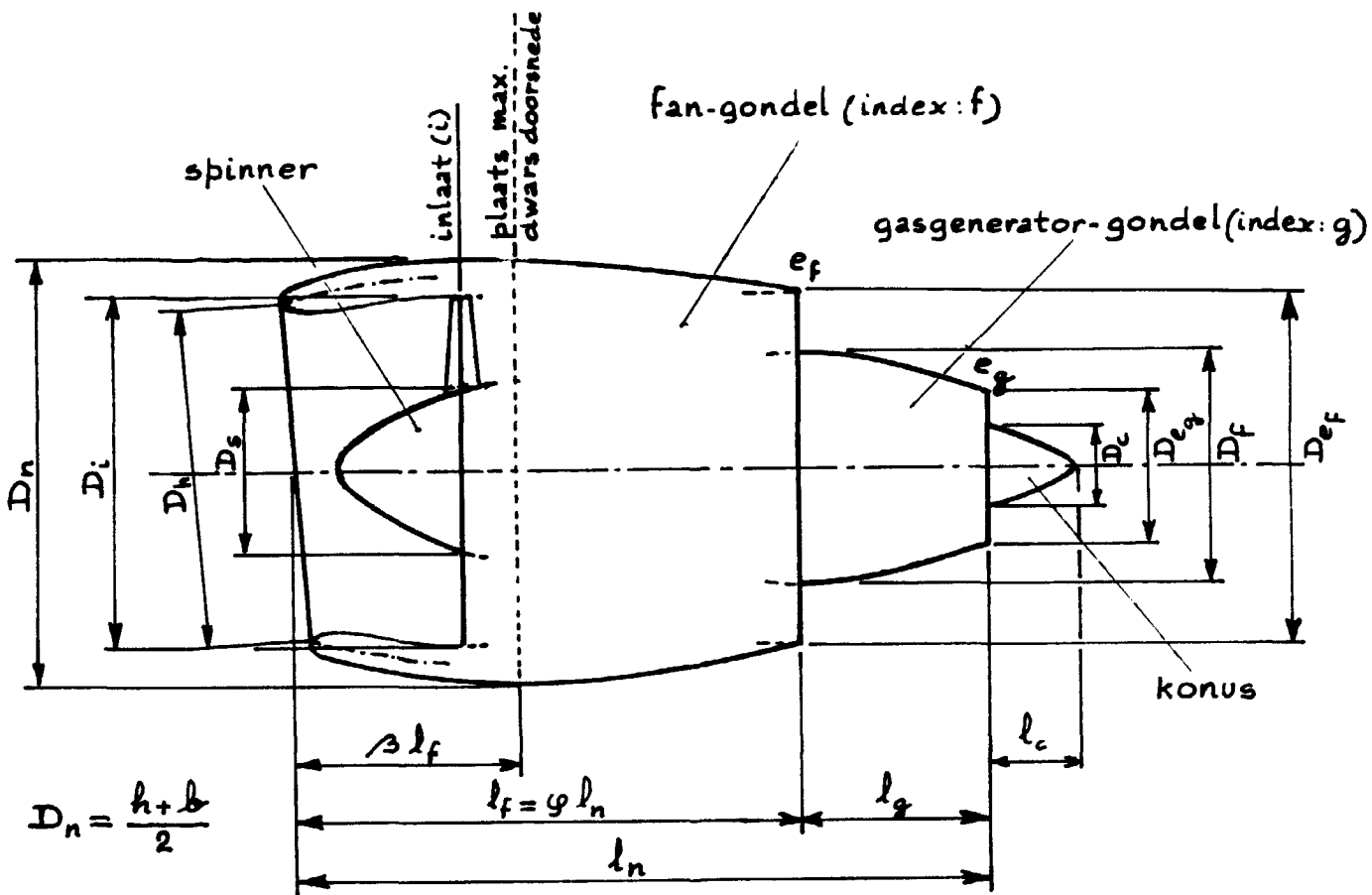


Fig. 2: Definities van de afmetingen van de motorgondel.

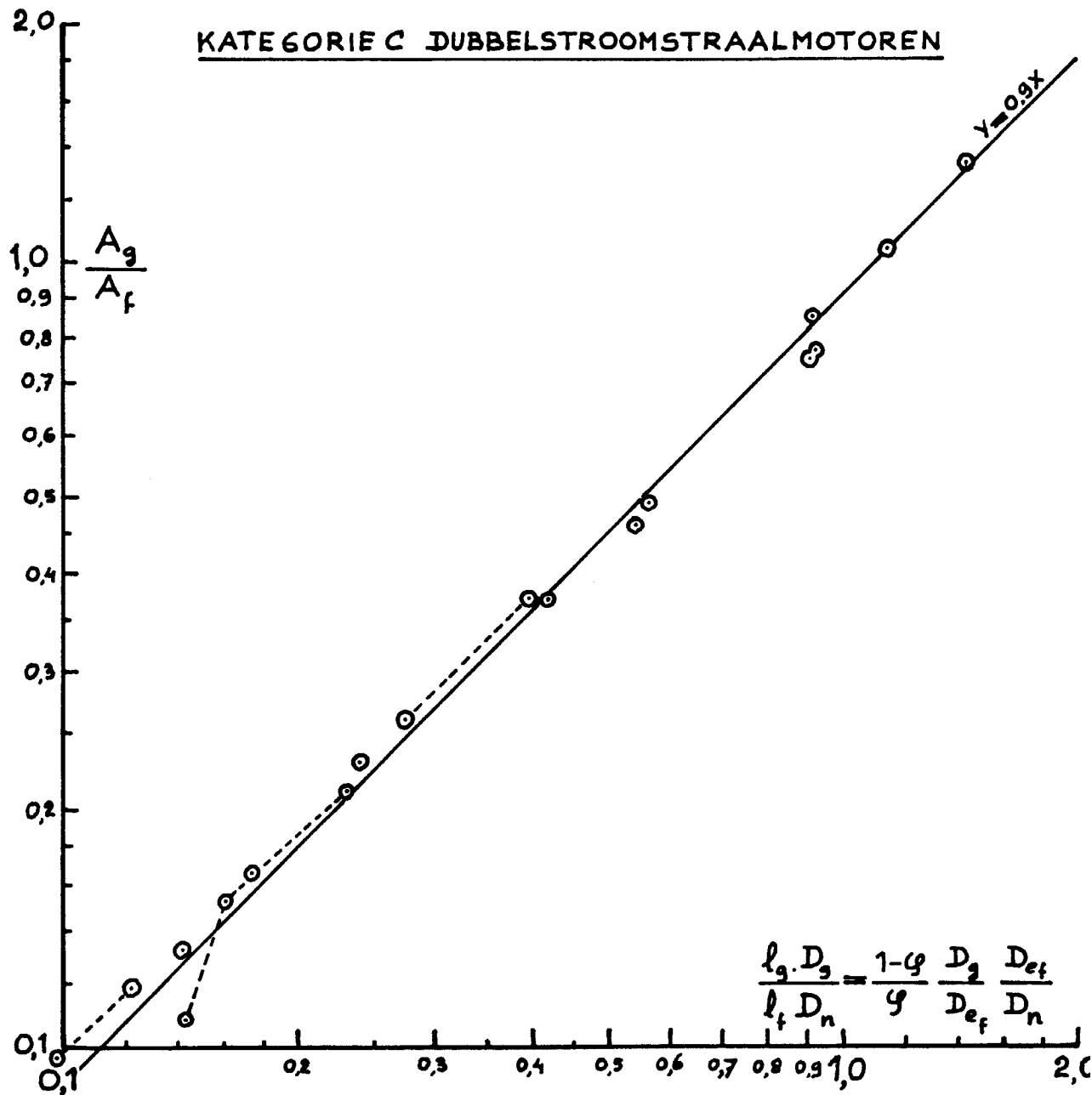


Fig. 3: De verhouding A_g/A_f als functie van $\frac{l_g \cdot D_g}{l_f \cdot D_n}$

KATEGORIE C DUBBELSTROOMSTRAALMOTOREN

$$F(\varphi) = \frac{1 + 0,06\varphi \left(\frac{l_f + l_g}{D_i}\right)}{1 + 0,06 \left(\frac{l_f + l_g}{D_i}\right)} \left(1 + \frac{A_g}{A_f}\right) \varphi$$

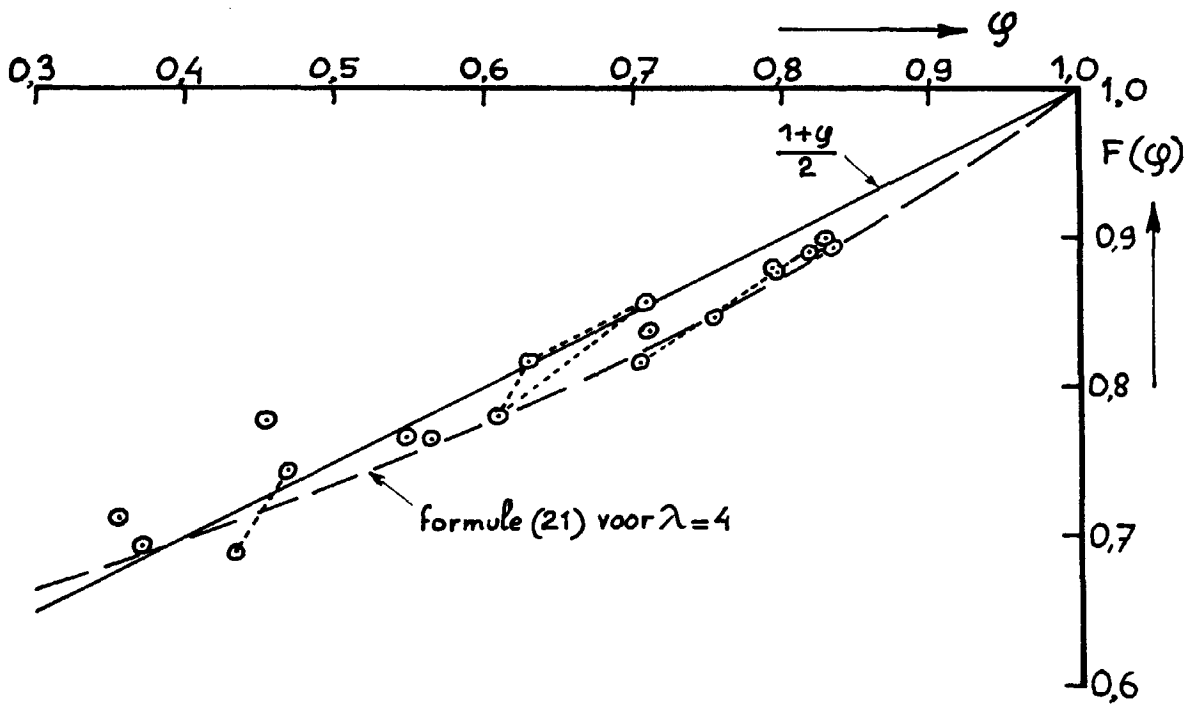
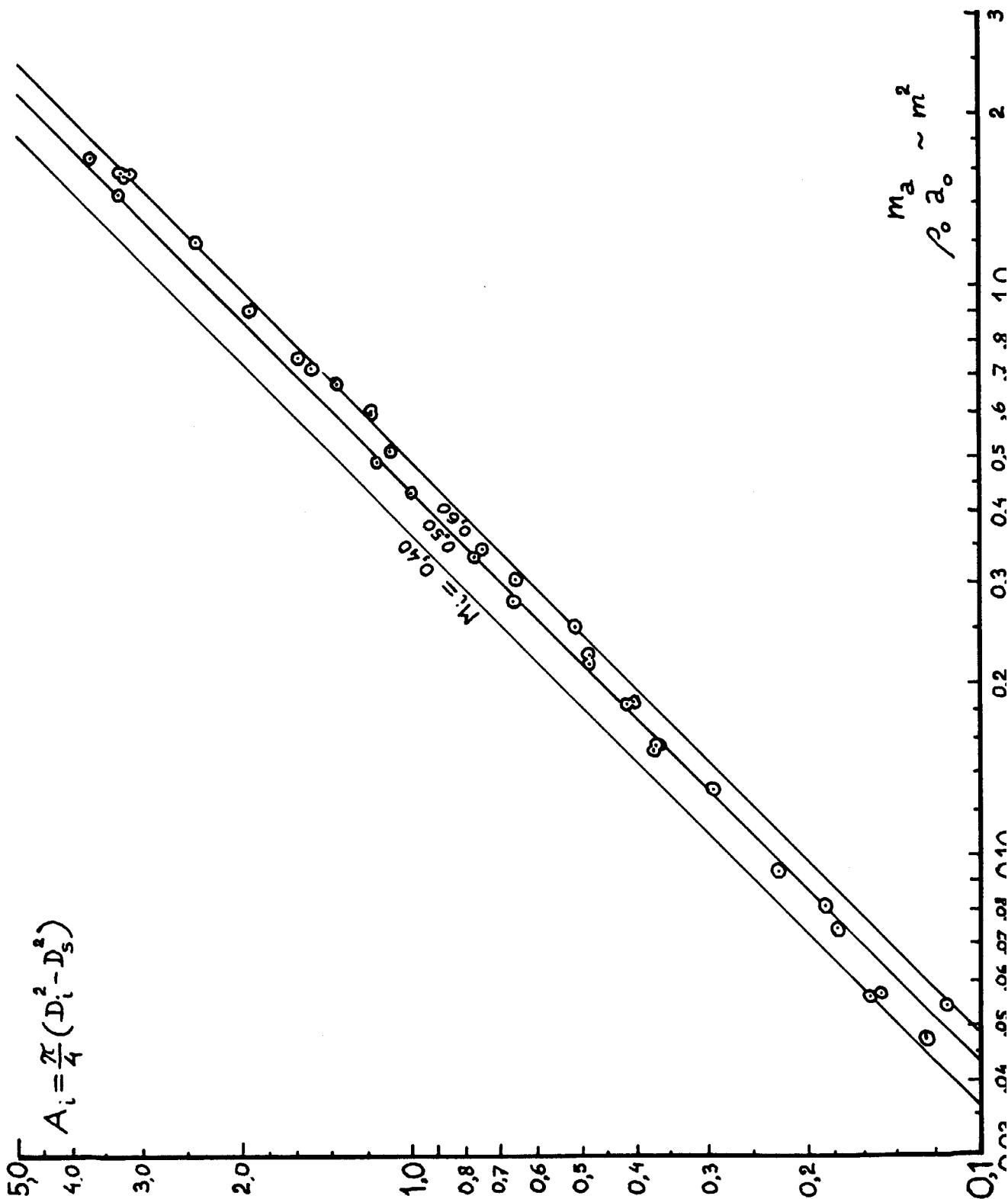


Fig.4: $F(\varphi)$ voor verschillende bestaande KAT.C dubbelstroomstraalmotoren.



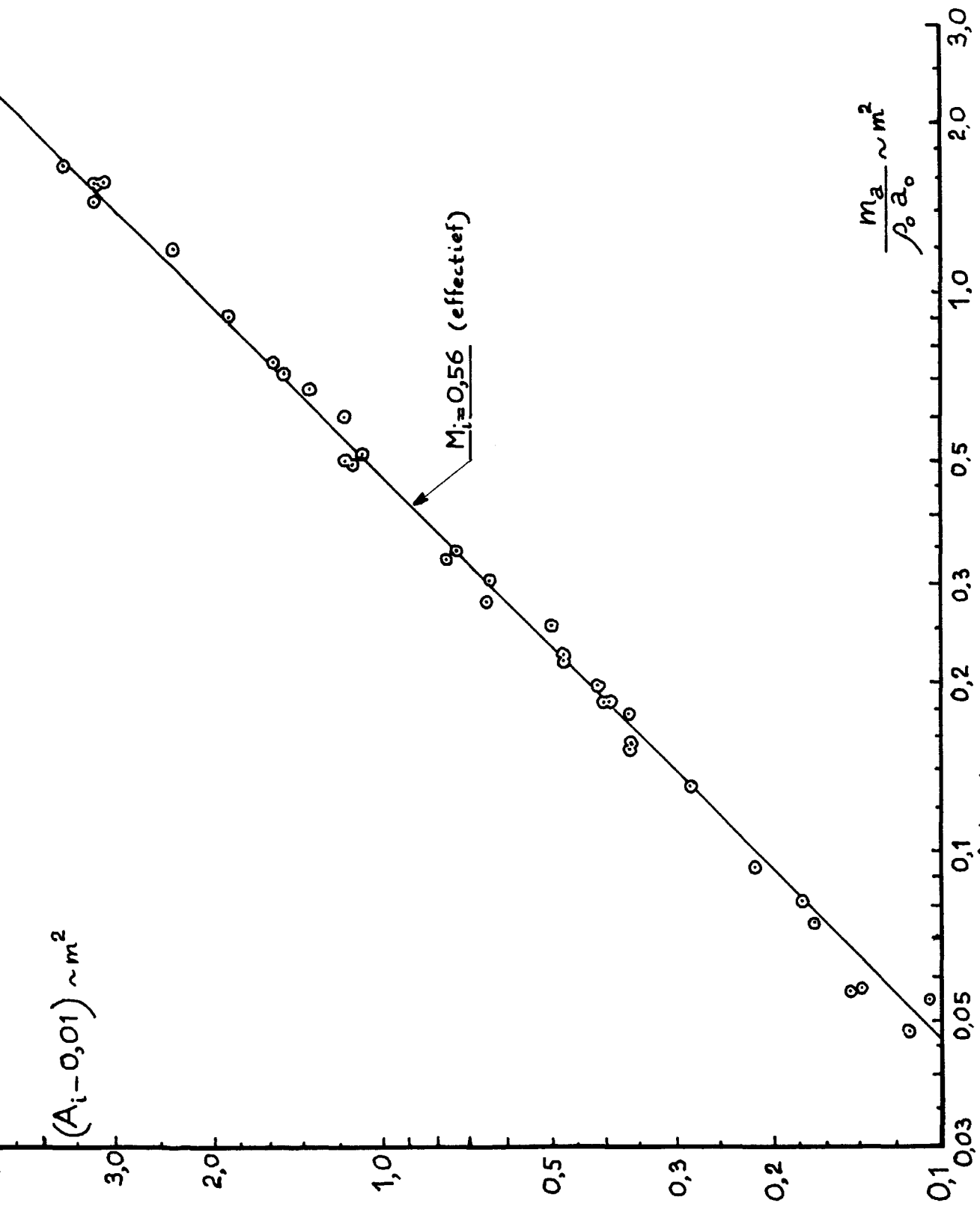
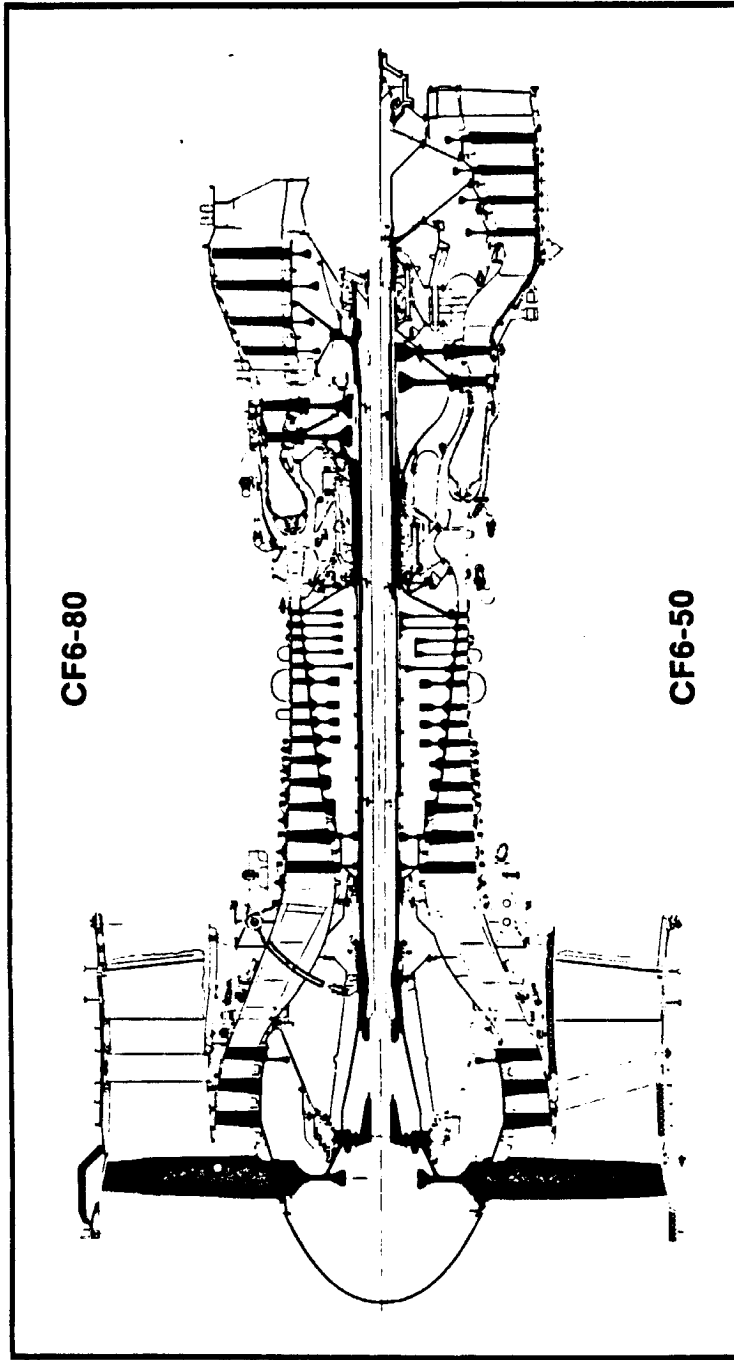
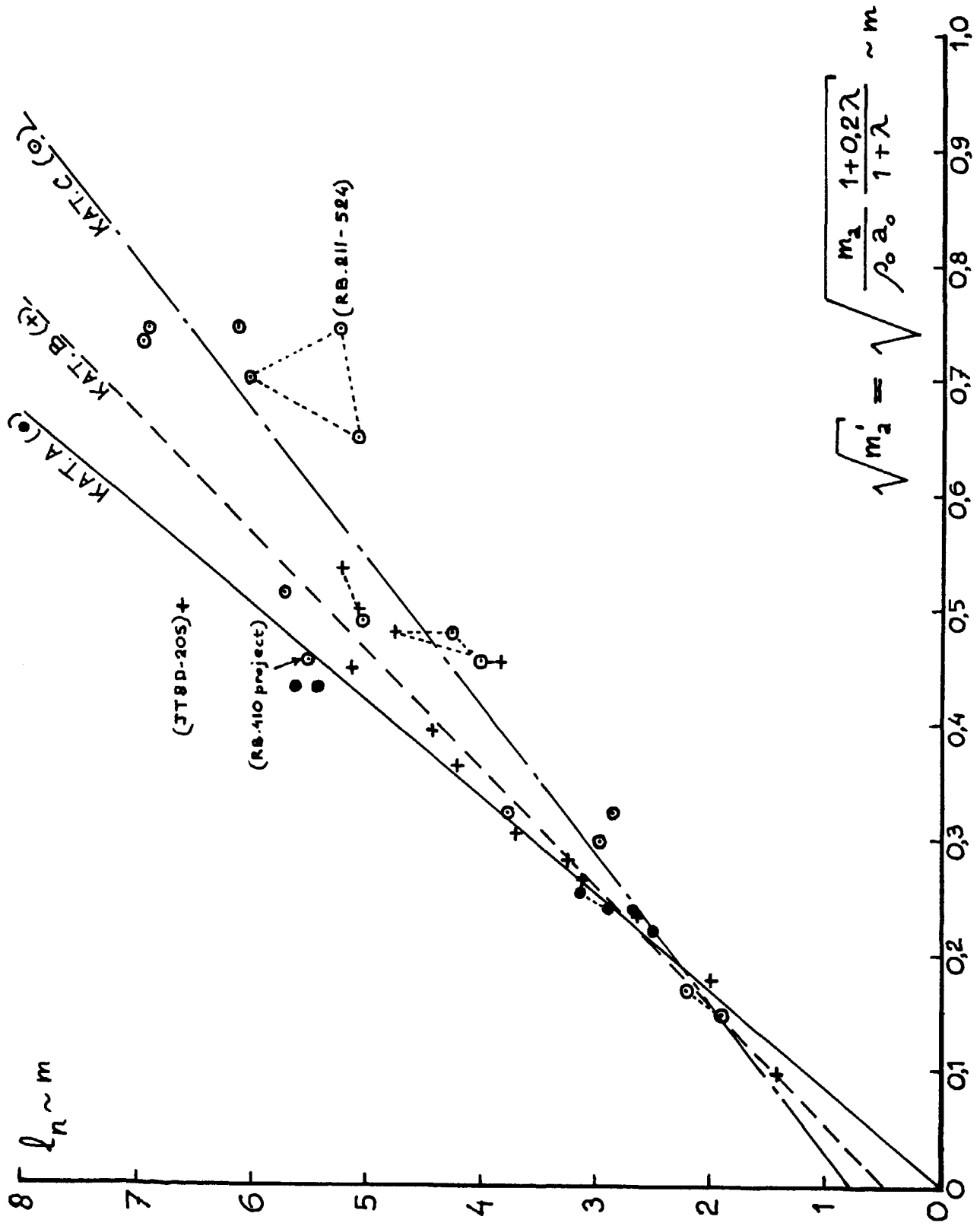


Fig.5b: Inlaatoppervlak als functie van de massaastroom.



Comparison of the cutaways for the CF6-50 and the new CF6-80 shows length of the latter reduced 16 in., principally by shortening the compressor diffuser and combustor and deleting the turbine midframe. The new powerplant will be lighter by 300-500 lb.

**Fig: 6: Verkorting vande motorlengte met 9,2% door verbeteringen
(General Electric CF6)**



$$\sqrt{m'_2} = \sqrt{\frac{m_2}{\rho_0 a_0} \frac{1+0,27\lambda}{1+\lambda}} \sim m$$

Fig.7: Gondellengte als functie van de gecorrigeerde luchtstroom $\sqrt{m'_2}$.

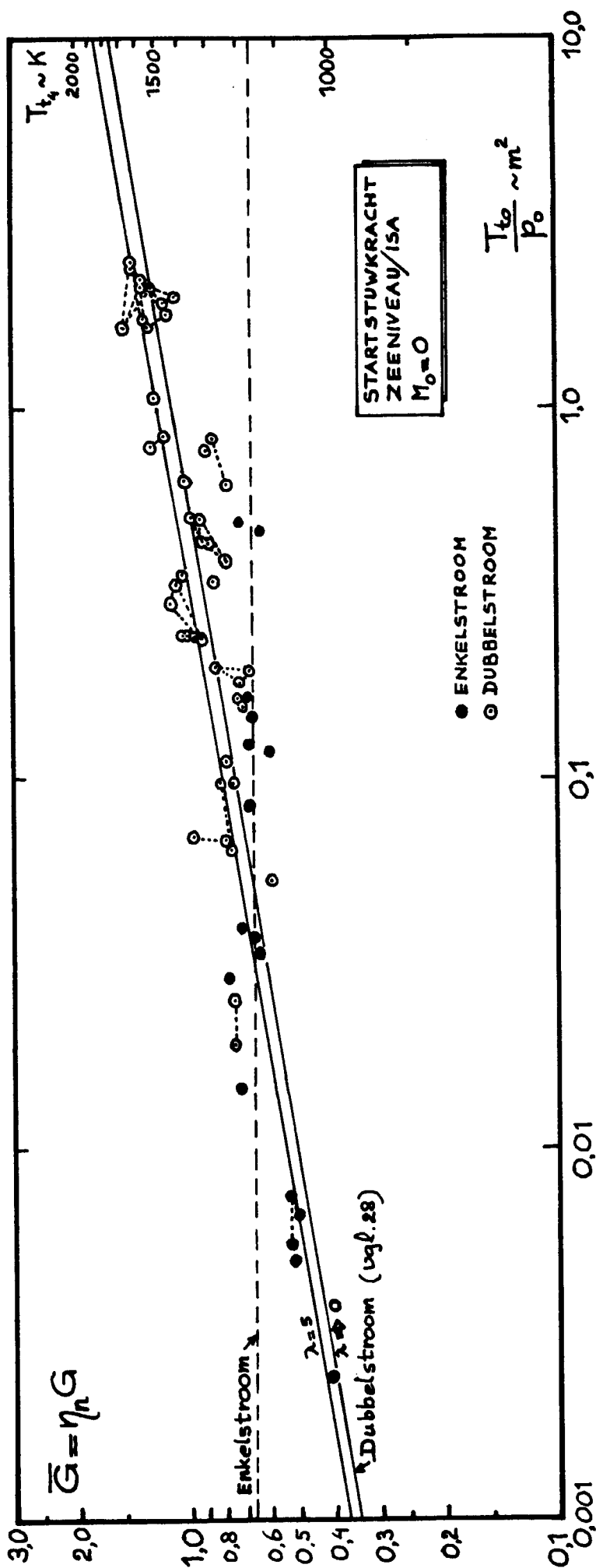


Fig. 8: Het specifieke gasgenerator-vermogen als functie van de trekkracht in de start

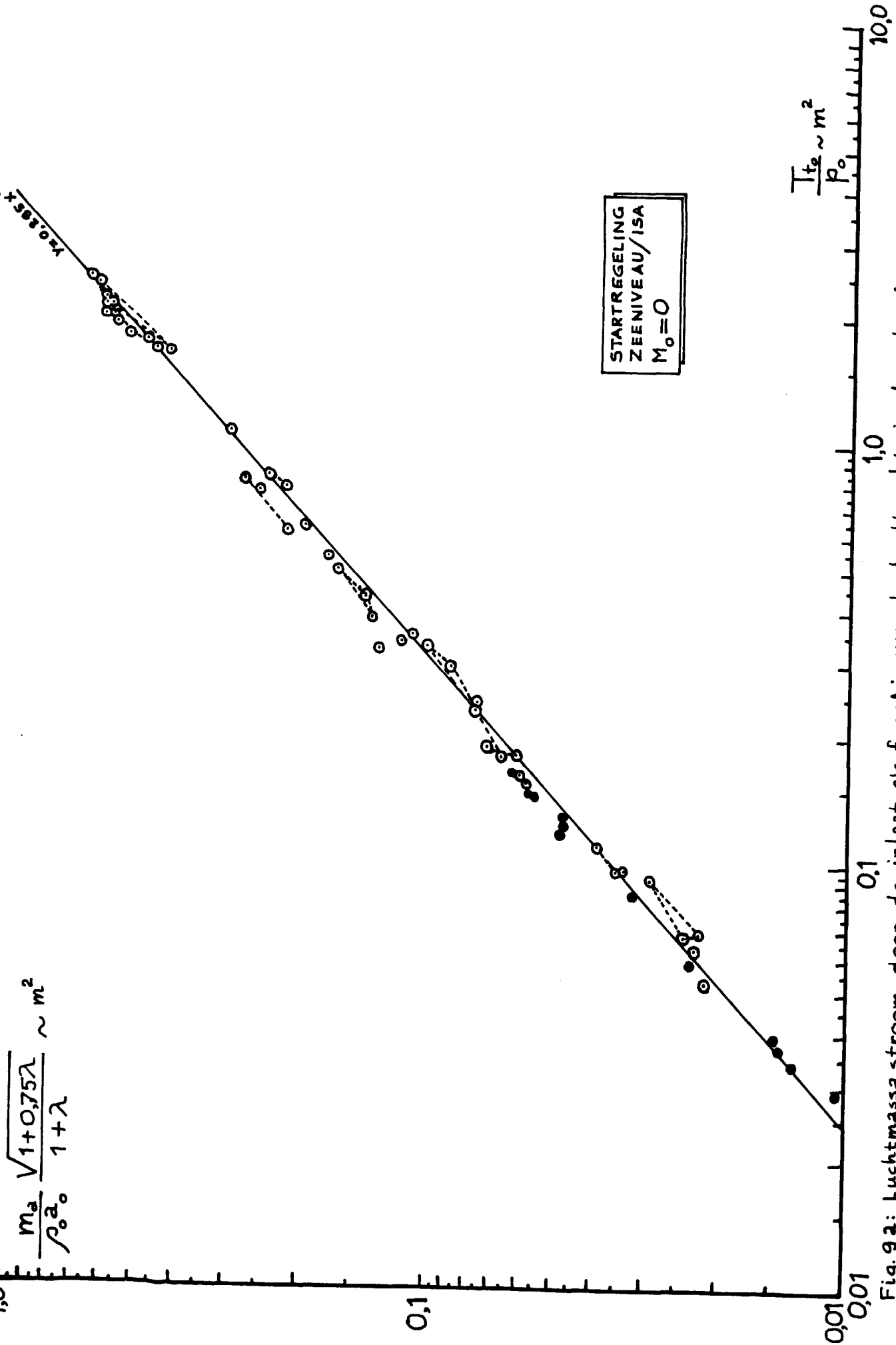
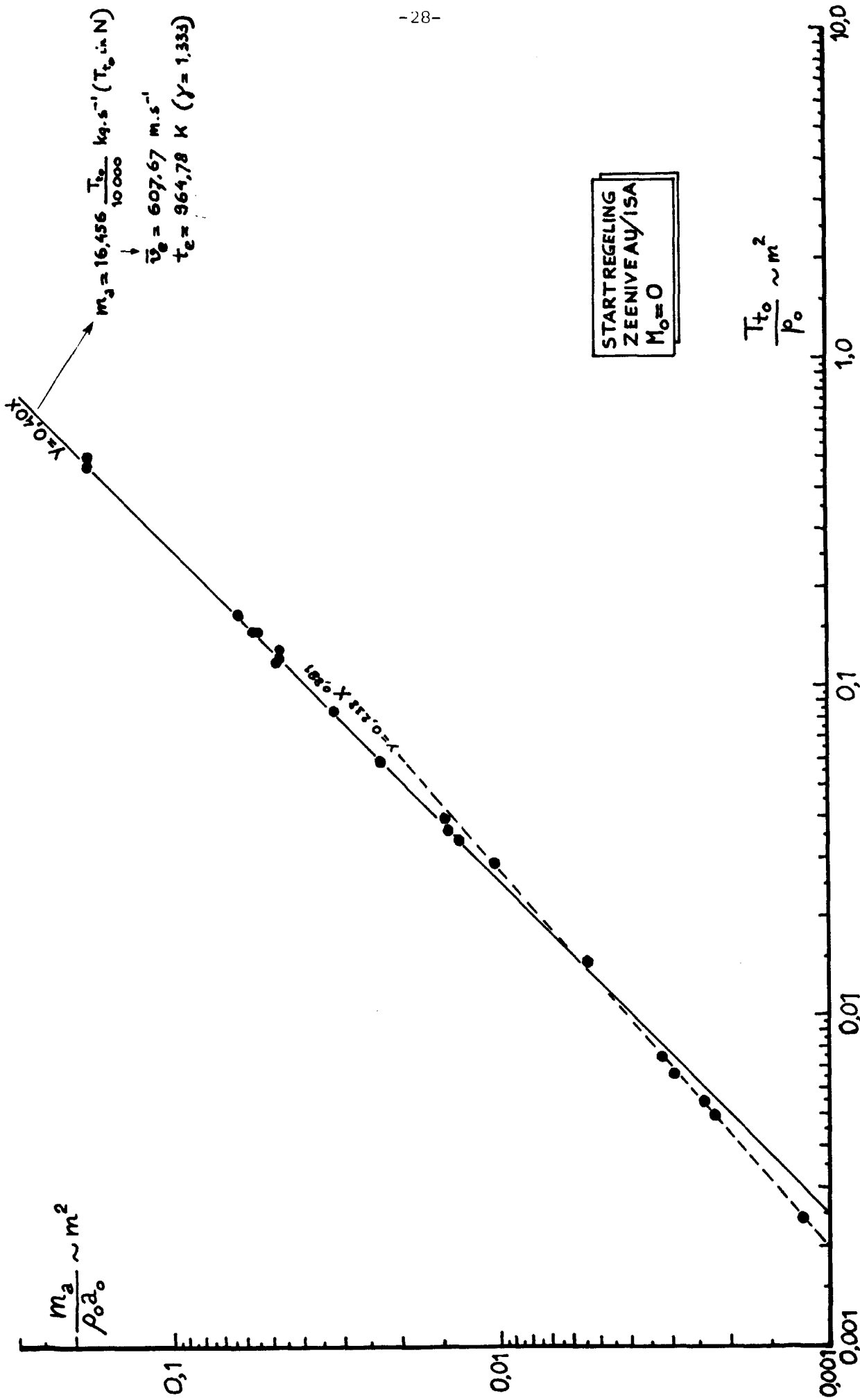


Fig. 92: Luchtmassa stroom door de inlaat als functie van de trekkraft in de start.



... in de staat hijs onkosten...
 ... in de staat hijs onkosten...
 ... in de staat hijs onkosten...

Opmerkingen: Voor $F(\varphi)$, zie fig. 4

Voor \bar{G} , zie fig. 8 of ugl. 26a, c, 27.

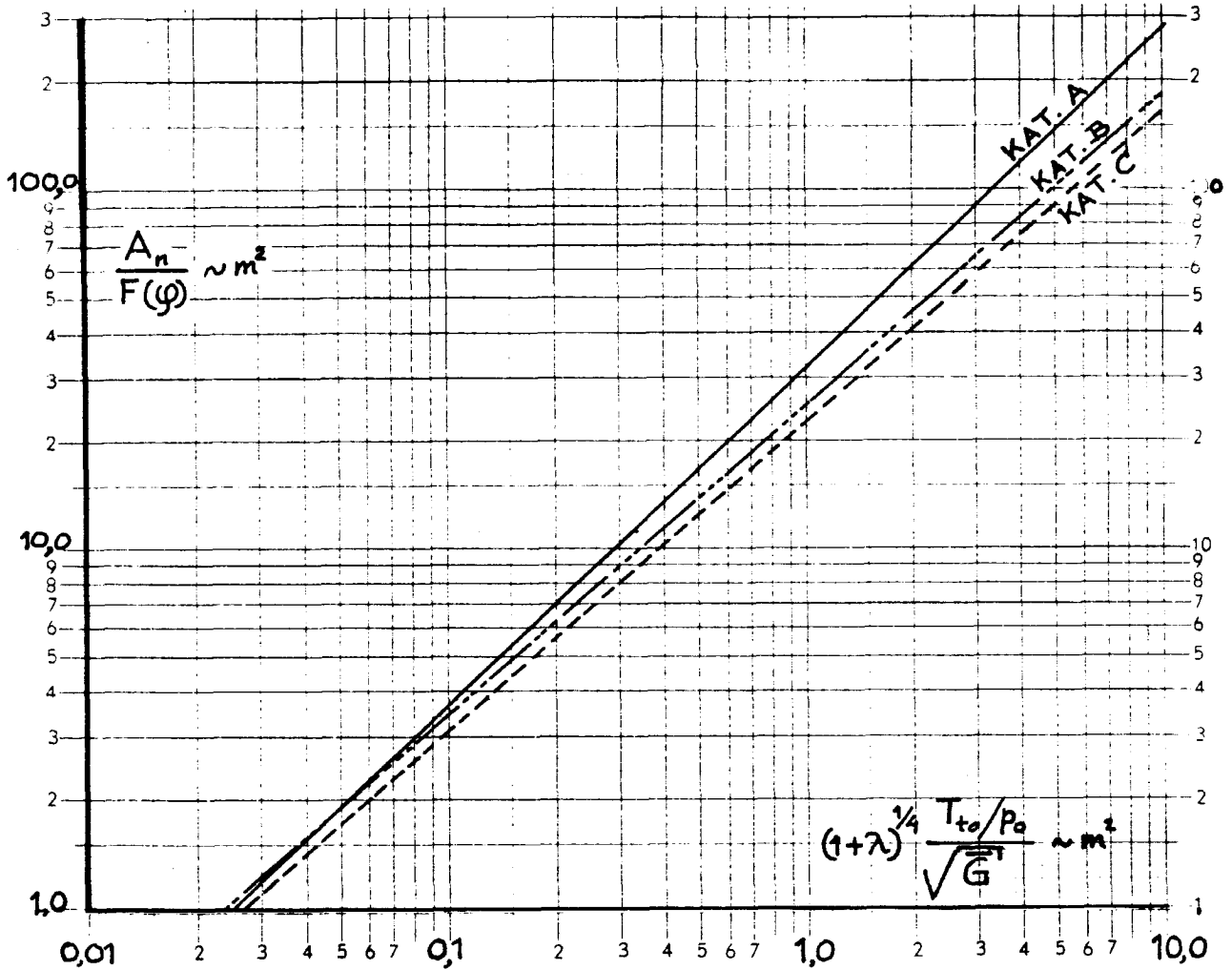
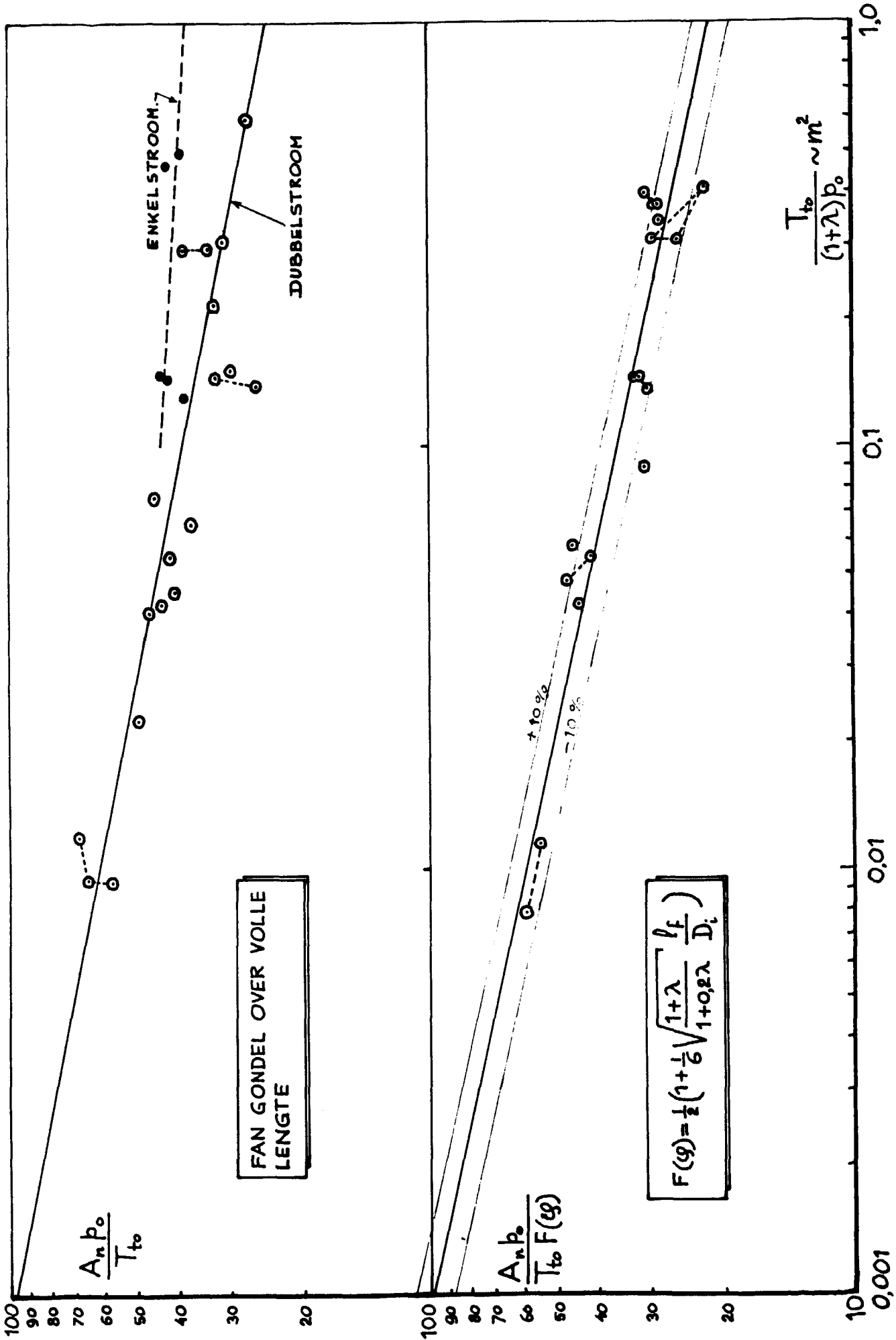


Fig. 10: Omspoeld gondeloppervlak als functie van T_{to} , \bar{G} , λ en φ .



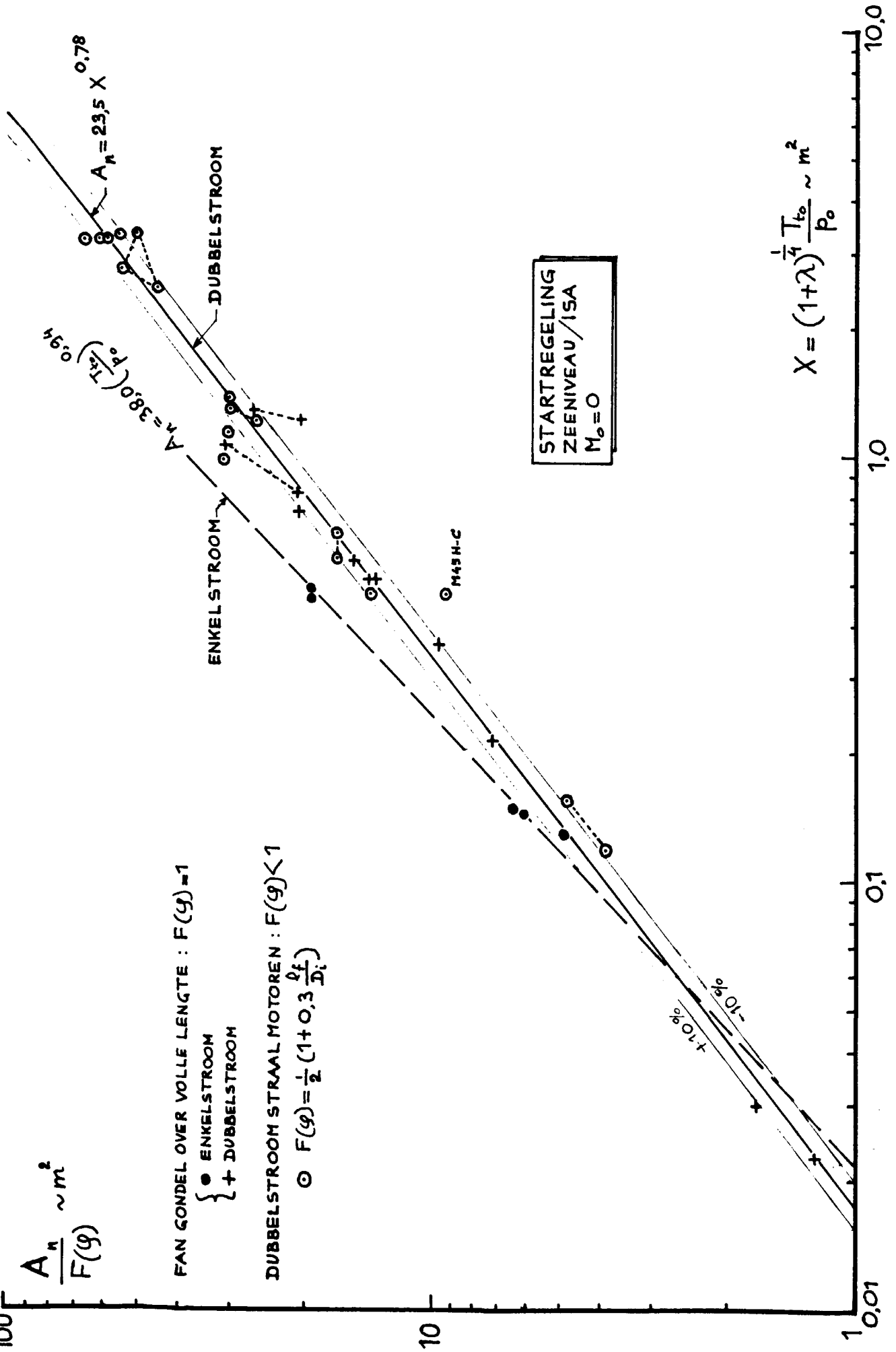


Fig.12: Eenvoudige correlatie van gondeloppervlak met stuwkracht en omloopverhouding.

Memorandum 445



60142021182