35 | Februar 1957

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Prof. Dr. K. Wieghardt

Bemerkungen zum geplanten Umbau des Windkanals des IFS

TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG
Prof. Dr.-Ing. G. Weinblum

Bemerkungen zum geplanten Umbau des Windkanals des IfS.

von
Prof. Dr. K. Wieghardt

Hamburg, Februar 1957

Bemerkungen zum geplanten Umbau des Windkanals des IfS.

Der jetzige Windkanal des IfS nach Abb. 1 stellt eine Lösung einer altbekannten Aufgabenstellung dar: in einem gegebenen Versuchsraum sollte mit möglichst kleinen Kosten ein möglichst großer Kanal errichtet werden. Die Besonderheit liegt nur in der sehr langen Meßstrecke zum Studium von Schiffbauproblemen.

Die Luft strömt dabei nach dem Verlassen der Meßstrecke frei durch den Versuchsraum wieder zum Gebläse zurück und verursacht eine gewisse Zugbelästigung der messenden Personen. Außerdem ist die Ausnutzung der Antriebsleistung bei dieser Anordnung natürlich schlechter als in Umlaufkanälen. Mit einem Motor von 30 PS werden nämlich in der Meßstrecke mit 1 m Durchmesser Geschwindigkeiten bis zu 32 m/s erreicht; der Gütegrad des Kanals ist somit:

$$(1) \qquad \text{Gütegrad } G = \frac{\text{Leistung in der Meßstrecke}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\frac{\varrho}{2}\, U^2 F\, U}{75\, N}$$

$$\frac{\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{8}\cdot 32^2\cdot 0{,}785\cdot 32}{75\cdot 30} = 0{,}7;$$

dabei ist ϱ = Luftdichte $\approx \frac{1}{8}$ kg s^2/m^4 , U = Geschwindigkeit in der Meßstrecke, $F = \frac{\pi}{4}\,(1\text{m})^2$ = Meßquerschnitt, N = Antriebsleistung in PS. Der Gütegrad von Umlaufkanälen ist dagegen gewöhnlich zwischen 2 und 3, in Einzelfällen sogar noch höher.

Die obige Definition des Gütegrads ist insofern sinnvoll und nützlich, als sich G für denselben Kanal als unabhangig von der jeweiligen Geschwindigkeit ergibt, solange die Verluste dem Staudruck proportional sind. Für eine kreisförmige Meßstrecke mit dem Durchmesser D folgt aus (1) sofort:

$$(2) \qquad U = 11{,}5\; G^{1/3}\; N^{1/3}\; D^{-2/3}.$$

Zur Abschätzung der höchsten erreichbaren Reynoldszahl eines Modells kann man daraus die Reynoldszahl des Meßstrahls berechnen (mit ν = kinematische Zähigkeit der Luft $\approx 1/7\ cm^2/s$):

(3) $UD/\nu = 0{,}80 \cdot 10^6 \cdot (G\ N\ D)^{1/3}$; N in PS, D in m.

Geschwindigkeit und Re-Zahl sind also nur der dritten Wurzel aus Leistung und Größe des Kanals proportional, was das Verlangen nach immer größeren, leistungsstärkeren und kostspieligeren Windkanälen entschuldigt.

Bei Problemen des Schiffbaus ist der Wunsch nach hohen Re-Zahlen im Versuch besonders dringend. Denn die Re-Zahl von Schiffen ist im Durchschnitt eine Zehnerpotenz größer als bei den meisten Modellversuchen. Damit die Extrapolation vom Versuch auf das Schiff nicht zu unsicher wird, braucht man daher Meßreihen über einen ganzen Bereich von Re-Zahlen, deren kleinste schon über der kritischen Re-Zahl des jeweiligen Problems liegen sollte, so daß Laminareffekte möglichst ausgeschlossen sind. Da nun die kostspielige Vergrößerung des Kanals oder der Antriebsleistung die Re-Zahl nach (3) nur wenig vergrößert, wird man versuchen, wenigstens den Gütegrad zu verbessern.

Eine Möglichkeit hierzu wird der geplante Neubau des Instituts geben. Es war beabsichtigt, den jetzigen Kanal in einen solchen mit Rückführung umzubauen (vgl. Abb.2). Für dessen Gütegrad wurde ein Wert von etwa 2 erwartet, also eine Steigerung von Geschwindigkeit und Re-Zahl der 1 m -Meßstrecke um 42 %, da $(2/0{,}7)^{1/3} = 1{,}42$, bei gleichem Motor und E-Anlage.

Im Januar 1957 wurde nun von Seiten der Ingenieurschule, in deren Räumen das Institut für Schiffbau und der Windkanal sich zur Zeit befinden, angefragt, ob der Kanal für ihre neu gegründete Luftfahrt-Abteilung erworben werden könnte. Falls der Verkauf zustande kommt, kann daher ein ganz neuer Kanal gebaut werden. Da die Bauplanung der Architekten jedoch schon weit fortgeschritten ist, kann der Grundriss des Kanalraums, also im wesentlichen die Rückführung, nicht mehr geändert werden. In diesem Rahmen soll nun die günstigste Anordnung von Meßstrecke und Gebläse gefunden werden.

Die Meßstrecke soll nach wie vor etwa 6 m lang werden, um die Möglichkeiten des Meßkäfigs (größte nutzbare Länge = 5 bis 6 Durchmesser) voll auszunutzen. An den Auffangtrichter schließt sich der Diffusor und das Gebläse an, daran ein Uebergangsstück von 2 m Durchmesser auf 2x2 m^2 quadratischen Querschnitt und die Umlenkung um 180° durch zwei Ecken mit Leitschaufeln. In der Rückführung wird der Querschnitt allmahlich zunächst vertikal vergrößert und dann seitlich. Der Querschnitt wird dann so groß, daß es nicht nötig erscheint, das zweite Umlenken des Luftstroms durch Leitschaufeln zu unterstützen. Die punktierte Linie unter 45° in Abb.2 stellt ein "Staubtuch" dar: ein Tuch oder sehr feines Sieb, das auch feine Staubteilchen filtern soll bei eventuellen Hitzdrahtmessungen; außerdem soll es eine Vergleichmäßigung der Geschwindigkeitsverteilung beim Umlenken erzwingen. Die Luft kommt dann in eine große Druckkammer mit 4x4 m^2 Querschnitt mit dem Gleichrichter und einem oder zwei Sieben, falls erforderlich. Die Düse besteht aus einem Holzteil, der auf einen runden Querschnitt von 2 $m^{\varnothing}$ führt, und einer zweiten Metalldüse bis zum eigentlichen Meßquerschnitt. Das große Kontraktionsverhältnis soll die Strahleigenschaften verbessern, insbesondere den Turbulenzgrad.

In der Außenwand der Rückführung sind zwei Tore vorgesehen, die nach innen so weit eingeschwenkt werden können, daß sie die Rückführung versperren. Es wird dann Außenluft durch das eine Tor angesaugt und nach dem Passieren der Meßstrecke durch das andere Tor wieder ins Freie ausgeblasen. Diese Variationsmöglichkeit ist für Versuche mit (chemischem) Rauch (z.B. für Schornsteinversuche) notwendig.

Ferner soll auch eine Meßstrecke mit 2 m Durchmesser - anschließend an die Holzdüse - vorgesehen werden. Der Diffusor nach der Meßstrecke mit kleinerem Durchmesser müßte dann ausgewechselt werden gegen ein Rohr mit 2 $m^{\varnothing}$, das zu dem Geblase direkt hinführt. Dabei ist ein Gebläse mit 2 $m^{\varnothing}$ vorausgesetzt; der ungünstigere Fall eines billigeren kleineren Gebläses wird weiter unten auch behandelt. Zunächst könnte man vermuten, in diesem Strahl bei derselben Motorleistung größere Re-Zahl zu erzielen als in einem kleineren Strahl. Das ist aber nicht der Fall. Wie im Anhang gezeigt wird, ist der optimale Strahldurchmesser für diese Anordnung etwa 1,2 bis 1,3 m. Bei größerem Durchmessern fällt der Gütegrad nämlich so schnell ab, daß auch das Produkt G D kleiner wird und damit auch die Re-Zahl nach Gleichung (3). Das erklärt sich daraus, daß im 2 m-Strahl z.B. die Verluste in den ersten beiden Umlenkungen - bezogen auf den Staudruck in der Meßstrecke - schnell anwachsen, wenn die Geschwindigkeit hinter der Meßstrecke nicht durch einen Diffusor verlangsamt wird.

Zuverlässig messen kann man natürlich nur dann, wenn die Geschwindigkeit eine gewisse Mindestgröße übersteigt, z.B. U = 10m/s. Der Bereich, in dem die Re-Zahl variiert werden kann, ist daher im kleinen Strahl auf jeden Fall größer als im 2m-Strahl.

Eine zusätzliche 2m-Meßstrecke hat aber gerade für den Schiffbau große Vorteile. Es können größere Modelle untersucht werden (wenn auch bei etwas schlechterem Turbulenzgrad als in der kleineren Meßstrecke wegen der schwächeren Kontraktion). Bei Untersuchungen über die Windkräfte auf das Ueberwasserschiff (auch bei Schräganströmung) kann dies von entscheidender Bedeutung sein; denn die modellmäßige Darstellung kleiner, eventuell aber sehr wichtiger Einzelheiten des Aufbaus setzt eine gewisse Mindestgröße des ganzen Modells voraus.

Ferner könnten dann auch die jeweiligen Kanalkorrekturen experimentell überprüft werden durch Messungen am selben Modell im kleinen und großen Meßquerschnitt. Im 2m-Strahl wird die Meßstrecke natürlich nur rund drei Durchmesser lang statt 5 bis 6.

Eine zahlenmäßige Abschatzung der verschiedenen Möglichkeiten wird im Anhang durchgeführt. Die Ergebnisse für den 1,2 m-Strahl und für den 2 m-Strahl bei verschiedenen Motorleistungen und Gebläsedurchmessern D_G sind in der folgenden Tabellenzusammengestellt. Die erste Zahl gibt die erreichbare Höchstgeschwindigkeit U, die zweite Zahl die größte Re-Zahl des Strahldurchmessers UD/ν und die dritte Zahl die geschätzten Anschaffungspreise für Gebläse, Motor und E-Anlage in Tausenden DM an.

	1,2m-Strahl L/D = 5 D_G = 1,4 m G = 2,0	2 m-Strahl mit Lange/Durchmesser = 3. D_G = 2 m G = 0,908	 1,8 m 0,771	 1,6 m 0,609	 1,4 m 0,437
30 PS	39,5 $3,29 \cdot 10^6$ 21,2	21,8 $3,03 \cdot 10^6$ 30,2	20,6 $2,87 \cdot 10^6$ 26,7	19,0 $2,65 \cdot 10^6$ 23,7	17,1 $2,38 \cdot 10^6$ 21,2
60 PS	49,7 $4,15 \cdot 10^6$ 27,0	27,4 $3,82 \cdot 10^6$ 36,0	26,0 $3,62 \cdot 10^6$ 32,5	24,0 $3,34 \cdot 10^6$ 29,5	21,5 $3,00 \cdot 10^6$ 27,0
90 PS	56,9 $4,74 \cdot 10^6$ 31,6	31,4 $4,36 \cdot 10^6$ 40,6	29,7 $4,13 \cdot 10^6$ 37,1	27,5 $3,82 \cdot 10^6$ 34,1	24,6 $3,43 \cdot 10^6$ 31,6
120 PS	62,6 $5,22 \cdot 10^6$ 35,5	34,6 $4,81 \cdot 10^6$ 44,5	32,8 $4,55 \cdot 10^6$ 41,0	30,2 $4,21 \cdot 10^6$ 38,0	27,1 $3,78 \cdot 10^6$ 35,5

Der Gebläsewirkungsgrad ist dabei stets zu $\eta = 0,8$ angenommen. Bezüglich der größten Reynoldszahl ist die Meßstrecke mit einem Durchmesser von 1,2 m leistungs- und preismäßig der großen Strekke deutlich überlegen.

Für den 2 m-Strahl sind die Tabellenwerte in Abb.3 graphisch aufgetragen: Reynoldszahl über Preis von Gebläse+Motor+E-Anlage. Danach sind z.B. im Bereich der Re-Zahlen von 3,5 bis $4,2 \cdot 10^6$ Gebläse mit einem Durchmesser von 1,6 oder 1,8 m gleichwertig einem 2 m-Rad, aber etwa 2.000,--DM billiger. Wenn man sich aber zu einer 2 m$^\varnothing$-Meßstrecke entschließt, wird man besser doch ein 2 m-Rad wählen, da man sonst zwischen Meßstrecke und Gebläse eine Kontraktion anfertigen müsste statt eines einfachen, zylindrischen Rohrs von 2 m$^\varnothing$.

Bei gleichem Preis und Motorstärke ist in der kleinen Meßstrecke mit 1,2 m$^\varnothing$ die Re-Zahl stets um rd. $1 \cdot 10^6$ größer als im 2 m$^\varnothing$-Strahl.

Uebrigens sind die Windkräfte an einem Modell in turbulenter Strömung proportional $\frac{\varrho}{2} U^2 L^2$ und damit auch $\sim Re^2$; d.h. die Kräfte sind unabhängig von der Modell- und Strahlgröße, wenn dieselbe

Re-Zahl erreicht wird.

Zusammenfassung:

In dem Raum, der im Neubau des Instituts für Schiffbau für den Windkanal vorgesehen ist, läßt sich die größte Reynoldszahl bei gegebener Motorleistung dann erzielen, wenn der Meßquerschnitt einen Durchmesser von 1,2m bei 6 m Länge hat. Man kann darin z.B. langgestreckte Rotationskörper mit einem Durchmesser von d = 240mm untersuchen, ohne daß die Kanalkorrektur für den Druck 1 % des Staudrucks übersteigt. Bei 30 PS Motorleistung wird hier U = 40 m/s und $UD/\nu = 3{,}3\cdot10^6$. In der vorhandenen Meßstrecke mit 1 m⌀ würde man U = 46 m/s und $UD/\nu = 3{,}2\cdot10^6$ erreichen, während bisher - ohne Rückführung der Luft aber auch mit 30 PS - die Höchstgeschwindigkeit 32 m/s beträgt und die Re-Zahl $2{,}2\cdot10^6$.

Um größere Modelle untersuchen zu können, müßte man die Möglichkeit vorsehen, durch einen kleinen Umbau des Kanals auch einen 2 m -Strahl zu erzeugen. Die Geschwindigkeit wird dann allerdings um soviel kleiner, daß auch die Re-Zahlen noch kleiner sind als im 1,2 m-Strahl. Doch können dann noch z.B. Rotationskörper von d = 400 mm ausgemessen werden. Bei Modellen mit wesentlichen, aber geometrisch kleinen Einzelheiten kann die Verwendung von so großen Modellen unter Umständen unerlässlich sein.

Wenn man sich zur wahlweisen Benutzung einer 1,2 m⌀- und einer 2 m -Meßstrecke entschließt, ist ein Gebläse mit 2 m⌀ trotz des Mehrpreises von etwa 9.000,--DM gegenüber einem 1,4 m⌀-Gebläse zu empfehlen, einerseits um den Gütegrad der 2 m-Strecke nicht zu sehr zu verschlechtern, vor allem aber um den Umbau des Kanals zu erleichtern.

Schrifttum.

[1] A. Pope: Wind-Tunnel Testing. New-York, 1954

[2] B. Eck: Technische Strömungslehre. Springer, 1948

[3] K. Wieghardt: Some Remarks on the Resistance of Screens. Aero. Quart. IV (1953), S. 186.

[4] F. Vandrey: A.R.L. Report: A.R.L./R.2/G/HY/4/1.

Anhang: Abschätzung der im Windkanal zu erwartenden Druckverluste. (Die Ueberlegungen gelten natürlich auch für Wasserkanäle mit $\varrho = 102\ kgs^2/m^4$ und $\nu = 1,3\cdot 10^{-6} m^2/s$.)

1. Allgemeine Formeln und Definitionen.

Die örtliche mittlere Geschwindigkeit u im Kanal bestimmt sich aus der Kontinuität zu

$$u = \frac{F}{f} U, \quad \text{mit } f = \text{örtlicher Kanalquerschnitt}$$
$$U = \text{Geschwindigkeit in der Meßstrecke}$$
$$F = \text{Querschnittsfläche in der Meßstrecke.}$$

Der Druckverlust Δp im jeweiligen Kanalteil ist

$$\Delta p = k \frac{\varrho}{2} u^2, \quad k = \text{örtliche Widerstandszahl.}$$

Es ist zweckmäßig, alle Druckverluste auf den Staudruck in der Meßstrecke zu beziehen:

$$\Delta p = \varepsilon \frac{\varrho}{2} U^2, \quad \text{mit } \varepsilon = k \left(\frac{u}{U}\right)^2 = k \left(\frac{F}{f}\right)^2 = \text{auf die Meßstrecke bezogene Verlustzahl.}$$

(Wenn der Kanalquerschnitt überall rund ist, wird $\varepsilon = k(D/d)^4$ wegen $F = \pi D^2/4$ und $f = \pi d^2/4$.)

Der gesamte Druckverlust bei einem Umlauf der Luft ist dann

$$\Delta p_{ges} = \varepsilon_{ges} \frac{\varrho}{2} U^2, \quad \text{mit } \varepsilon_{ges} = \Sigma \varepsilon.$$

Diesen Druckverlust muß das Gebläse überwinden, wozu die Antriebsleistung N in PS nötig ist:

$$N = \frac{Q \Delta p_{ges}}{75\ \eta}, \quad Q = \text{Durchflußmenge} = F\,U \quad \text{und}$$
$$\eta = \text{Wirkungsgrad des Gebläses.}$$

Als Gütegrad G des Windkanals wird definiert:

$$G = \frac{\text{Leistung in der Meßstrecke}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\frac{\varrho}{2} U^2\ Q}{75\ N}.$$

Mit der Verlustzahl ε_{ges} kann man den Gütegrad auch schreiben:

$$G = \eta/\varepsilon_{ges}.$$

Hat man die einzelnen Widerstände k bzw. ε abgeschätzt und zu ε_{ges} summiert und daraus G berechnet, so folgt für die erreichbare Geschwindigkeit in der Meßstrecke

$$U = \left(\frac{75\ N\ G}{\varrho/2\ F}\right)^{1/3} = 10,6\ (G\ N/F)^{1/3} = 11,5\ (G\ N/D^2)^{1/3}\ ;$$

mit $\varrho = \frac{1}{8}$ kg s^2/m^4 und $\nu = \frac{1}{7}$ cm^2/s für Luft wird ferner die Re-Zahl des Strahldurchmessers, als Kennzahl für die größte Re-Zahl eines Modells im Kanal:

$$UD/\nu = 0{,}80 \cdot 10^6\ (GND)^{1/3}.$$

2. Einzelne Anteile des Druckverlustes.

a) In einem Rohr gilt

$k = \lambda\ l/d$, l = Rohrlänge
d = Rohrdurchmesser

Verluste meist vernachlässigbar klein.

ud/ν	λ
10^6	0,012
10^7	0,008

b) Diffusor.

A. Pope [1] gibt eine Formel, nach der die Verluste sehr klein sind. Vorsichtiger ist wohl die übliche Faustformel (z.B. Hütte I)

$$\varepsilon = (F/F_1)^2\ [1 - F_1^2/F_2^2]\ (1 - \eta_{Diff})\ ,\ \text{mit}$$

F = Meßquerschnitt
F_1 = Anfangsquerschnitt des Diffusors
F_2 = Endquerschnitt des Diffusors
η_{Diff} = Wirkungsgrad des Diffusors.

Ist der gesamte Oeffnungswinkel des (runden) Diffusors kleiner als 8 oder 9°, so wird η_{Diff} = 0,8 bis 0,85.

Somit wird

$$\varepsilon = 0{,}2\ (F/F_1)^2\ [1 - F_1^2/F_2^2].$$

Speziell für ein Uebergangsstück rund auf quadratisch wird

$$\varepsilon = 0{,}2\ [1 - (\pi/4)^2]\ F^2/F_1^2 = 0{,}077\ F^2/F_1^2\ .$$

c) Meßstrecke.

In einer geschlossenen Meßstrecke wird ähnlich wie im Rohr

$k = \varepsilon = \lambda L/D$, L = Länge der Strecke, D = Durchmesser.

Für einen nicht zu langen Freistrahl empfiehlt A.Pope

$$k = \varepsilon = 0{,}08\ L/D.$$

Im Meßkäfig ist der Strahlumfang zu 80 % abgedeckt und zu 20 %

offen; man könnte daher ansetzen

$\varepsilon = (0,8\ \lambda + 0,2 \cdot 0,08)$ L/D. z.B. mit $\lambda = 0,01$ wird $\varepsilon = 0,024$ L/D.

Messungen im jetzigen Kanal ergaben tatsächlich

$\varepsilon = 0,025$ L/D.

d) Kontraktion.

Nach Pope ist $\varepsilon = 0,32\ \lambda\ l/D$; l = Länge der Kontraktion, D = Austrittsdurchmesser. ε meist vernachlässigbar.

e) Ecken mit Umlenkschaufeln.

Prandtl gibt k = 0,12 an, Eck [2] k = 0,20 und Pope k = 0,15 (bei Re = $0,5 \cdot 10^6$). Als Mittel sei angenommen

$\varepsilon = 0,15\ F^2/f^2$, f = Eintrittsquerschnitt.

f) Siebe.

Berechnung von k nach dem Nomogramm in Abb.4 nach [3].
Zum Ausgleich der Geschwindigkeitsverteilung über dem Querschnitt muß man Siebe mit nicht zu kleinem k wählen (Größenordnung 1 bis 5) damit sie hydrodynamisch wirksam sind. In der Druckkammer bleibt wegen des großen Querschnitts ε trotzdem klein.

Starken Einfluß auf den Gütegrad hat jedoch leider das Schutzsieb vor dem Gebläse, das bei der hier geplanten Anordnung unerläßlich ist. Der Widerstand ist wegen der hier noch großen Durchflußgeschwindigkeit groß, und man wird das Sieb oder Gitter so weitmaschig machen als aus Sicherheitsgründen noch zulässig erscheint. In den Zahlenrechnungen wurde eine Drahtstärke von 0,5mm und eine Maschenweite von 10 mm angenommen, also eineOeffnungsverhältnis β = offene/gesamte Siebfläche = $(1 - 0,5/10)^2 = 0,9025$.

g) Gleichrichter.

Der Widerstand des Gleichrichters ist fast vernachlässigbar. Pope gibt an: für quadratische Maschen k = 0,22 und für sechseckige

Zellen k = 0,20.

h) Modell.

In Kanälen mit sehr großem Gütegrad (im Leerzustand), also mit sehr kleinen Druckverlusten, kann der Widerstand des Modells ausschlaggebend werden:

$$\varepsilon = c_w\, f_{Modell}/F\,, \quad \text{mit } c_w = \text{Widerstandsbeiwert}$$

f_{Modell} = Widerstandsfläche des Modells.

3. Zahlenwerte für die geplante Anlage.

A) Gebläse mit 2 m Durchmesser.

Diffusor summarisch erfaßt vom Meßquerschnitt F bis zur Druckkammer mit 4x4 = 16 m^2 Querschnitt:

$$\varepsilon = 0{,}2\ (1 - F^2/256).$$

Zwei Ecken, Eintrittsquerschnitt f = 4 m^2:

$$2\varepsilon = 2 \cdot 0{,}15\ F^2/16.$$

Die geringen Verluste bei der Umlenkung vor der Druckkammer mögen so abgeschätzt werden, als ob auch dort Umlenkschaufeln vorhanden seien (f = 3x4 = 12 m^2):

$$2\varepsilon = 2 \cdot 0{,}15\ F^2/144.$$

Gleichrichter:

$$\varepsilon = 0{,}20\ F^2/16.$$

Kontraktion: mit $\lambda = 0{,}01$ und $l/D = 3$ wird

$$\varepsilon = 0{,}32 \cdot 0{,}01 \cdot 3 = 0{,}01.$$

Meßkäfig für L/D = 5:

$$\varepsilon = 0{,}025 \cdot 5 = 0{,}125.$$

Schutzsieb: $\beta = 0{,}9025$; $(1-\beta)/\beta^2 = 0{,}114$. Nach dem Nomogramm wird
c etwa gleich 1, also k = rd. 0,1 und

$$\varepsilon = 0{,}1\ (F/F_{\text{Gebläse}})^2 \;, \quad F_{\text{Gebläse}} = \frac{\pi}{4}\ 2^2 = 3.14\ m^2.$$

Sieb hinter dem Gleichrichter: angenommen k = 2,5

$$\varepsilon = 2{,}5\ (F/16)^2.$$

Staubtuch: nach dem Nomogramm k = 10 für ein Tuch geschätzt;

$$\varepsilon = 10\ (F/f)^2 \;, \quad \text{mit } f = 16\cdot\sqrt{2} = 22{,}6\ m^2.$$

Zusammen ergibt sich somit:

$\varepsilon =$	0,2	$-\ 0{,}0008\ F^2$	(Diffusor mit 0,80 Wirkungsgrad)
		$+\ 0{,}0188\ F^2$	(Ecken)
		$0{,}0021\ F^2$	(Umlenkung)
		$0{,}0008\ F^2$	(Gleichrichter)
	0,01		(Kontraktion)
	0,125		(Meßkäfig L/D = 5)
		$0{,}0101\ F^2$	(Schutzsieb)
		$0{,}0098\ F^2$	(Sieb)
		$0{,}0196\ F^2$	(Staubtuch)

$$\varepsilon_{\text{ges.}} = 0{,}335 + 0{,}0604\ F^2$$

Bei einem Gebläsewirkungsgrad von 0,80 folgt hieraus und aus Gl. (3) für die Re-Zahl abhängig vom Durchmesser D der Meßstrecke:

D (m)	F (m^2)	$\varepsilon_{\text{ges.}}$	G	GD	$(UD/\nu)/N^{1/3}$
1	0,785	0,372	2,15	2,15	$1{,}032\ 10^6$
1,2	1,133	0,413	1,94	2,32	$1{,}059\ 10^6$
1,315	1,36	0,447	1,79	2,36	$1{,}065\ 10^6$
1,5	1,765	0,523	1,53	2,30	$1{,}056\ 10^6$
2	3,142	0,932	0,86	1,72	$0{,}958\ 10^6$

Während der Gütegrad für wachsende Durchmesser monoton abnimmt, gibt es einen optimalen Durchmesser, für den eine größte Re-Zahl UD/ν erzielt wird. (Und zwar bei $D^4_{\text{opt.}} = \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{a}{3b}$, mit $\varepsilon_{\text{ges}} = a + b\ F^2$).

Nimmt man einen Diffusorwirkungsgrad von 0,85 statt 0,80 an, so erhält man $\varepsilon_{ges.} = 0{,}285 + 0{,}0606\ F^2$ und folgende Tabelle:

D (m)	F (m^2)	$\varepsilon_{ges.}$	G	GD	$(UD/\nu)/N^{1/3}$
1	0,785	0,322	2,485	2,485	$1{,}083 \cdot 10^6$
1,2	1,133	0,363	2,203	2,643	$1{,}106 \cdot 10^6$
1,26	1,245	0,379	2,108	2,66	$1{,}110 \cdot 10^6$
1,5	1,765	0,473	1,69	2,54	$1{,}090 \cdot 10^6$
2	3,142	0,884	0,905	1,81	$0{,}975 \cdot 10^6$

Gewählt werde ein Meßquerschnitt mit D = 1,2 m$^{\emptyset}$, F = 1,133 m^2. Dann ist man sehr nahe am optimalen Durchmesser und die Kontraktion ist auch noch gut: 4x4/1,133 = 14,1 : 1. Mit einem Wirkungsgrad von Diffusor und Gebläse von 80 % wird $\varepsilon = 0{,}413$ und G = 1,94. Geschwindigkeit und Re-Zahl, abhängig von der Motorleistung werden:

30 PS	39,5 m/s	$3{,}29 \cdot 10^6$
60 PS	49,7 m/s	$4{,}15 \cdot 10^6$
90 PS	56,9 m/s	$4{,}74 \cdot 10^6$
120 PS	62,6 m/s	$5{,}22 \cdot 10^6$

B) Gebläsedurchmesser kleiner als 2 m.

Für die Meßstrecke von 1,2 m$^{\emptyset}$ ist es praktisch ohne Belang, an welcher Stelle des Diffusors das Gebläse eingebaut wird, d.h. welchen Durchmesser D_G es zwischen 1,2 m und 2 m hat.

Bei der Meßstrecke mit 2 m$^{\emptyset}$ ergibt sich jedoch für $D_G < 2$ m eine Verschlechterung dadurch, daß dann eine Kontraktion von der Meßstrecke zum Gebläse mit anschließendem Diffusor nötig wird. Da die Meßlänge nach wie vor 6 m betragen soll, ist die Strecke hier nur drei Durchmesser lang statt 5 D wie beim 1,2 m-Strahl.

Zusätzlicher Druckverlust durch Diffusor von $F_{Gebläse}$ auf F = 3,14 m^2:

$$\Delta\varepsilon = 0{,}2\ \frac{F^2}{F^2}\ (1 - F_G^2/256) - 0{,}2\ (1 - F^2/256)$$

$$= 0{,}2\ (F^2/F_G^2 - 1) = 0{,}2\ (D^4/D_G^4 - 1).$$

Zusätzlicher Verlust durch höhere Geschwindigkeit im Schutzsieb:

$$\Delta\varepsilon = 0{,}1\ F^2/F_G{}^2 - 0{,}1\ F^2/\pi^2 = 0{,}1\ D^4/D_G{}^4 - 0{,}0101\ F^2.$$

Der Verlust im Meßkäfig verringert sich von 0,125 für L/D = 5 auf 0,025. 3 = 0,075 für L/D = 3, also um -0,050.

Insgesamt wird die Verlustzahl größer um

$$\Delta\varepsilon = 0{,}3\ D^4/D_G{}^4 - 0{,}25 - 0{,}0101\ F^2.$$

Für D = 2 m wird schließlich

$\varepsilon_{ges} = 0{,}581 + 0{,}3\ (2/D_G)^4$. Im Einzelnen wird:

D_G (m)	$\varepsilon_{ges.}$	G	$U/N^{1/3}$	$(UD/\nu)/N^{1/3}$
2	0,881	0,908	7,01	$0{,}975 \cdot 10^6$
1,8	1,038	0,771	6,64	$0{,}924 \cdot 10^6$
1,6	1,313	0,609	6,14	$0{,}854 \cdot 10^6$
1,4	1,830	0,437	5,50	$0{,}765 \cdot 10^6$

und daraus die in der Tabelle auf S. 5 angegebenen Geschwindigkeiten und Re-Zahlen.

Vom Umbau der jetzt vorhandenen Anlagenmit einem Motor von 30 PS und einem Gebläserad mit 1,4 m Durchmesser sind folgende Werte zu erwarten:

Meßstrecke D = 1m, Länge 6m, G = 2,15, U = 46,1 m/s, $UD/\nu = 3{,}21 \cdot 10^6$.

Meßstrecke D = 2m, Länge 6m, G =0,437, U = 17,1 m/s, $UD/\nu = 2{,}38 \cdot 10^6$.

(Jetzige Anlage D=1m, Länge 3,5m, G=0,7, U=32 m/s, $UD/\nu = 2{,}24 \cdot 10^6$).

4. Kanalkorrektur.

Die Kanalkorrektur im Freistrahl oder im Meßkäfig ist für langgestreckte Rotationskörper (Rankine'sche Ovoide) von F. Vandrey /4 berechnet worden. Mit d = Körperdurchmesser, L = Körperlänge

($\approx 2c$ = Abstand Quelle - Senke) und D = Strahldurchmesser wird der statische Druck in Körpermitte verglichen mit dem Druck in unbegrenzter Strömung um Δp zu groß. Bezogen auf den Staudruck der Anströmung wird

$$\frac{\Delta p}{\frac{\varrho}{2} U^2} = 2\left(\frac{d}{D}\right)^2 \left\{ - \sum_1^{\infty} \frac{e^{-K_n \cdot L/D}}{J_1^{\,2}(K_n)} + \frac{1}{2}\left(\frac{D}{L}\right) \right\} \quad ;$$

dabei sind die K_n die Nullstellen der Besselfunktion null'ter Ordnung: $J_o(K_n) = 0$. Numerisch wird

$$\frac{\Delta p}{\frac{\varrho}{2} U^2} = ff\left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

mit $ff(\frac{L}{D})$ nach nebenstehender Tabelle. Auf dieser Funktion beruht auch das Nomogramm für die Korrektur in Abb. 5.

L/D	f(L/D)
0,5	0,182
0,7	0,240
1	0,256
1,5	0,238
2	0,189
3	0,106
4	0,062

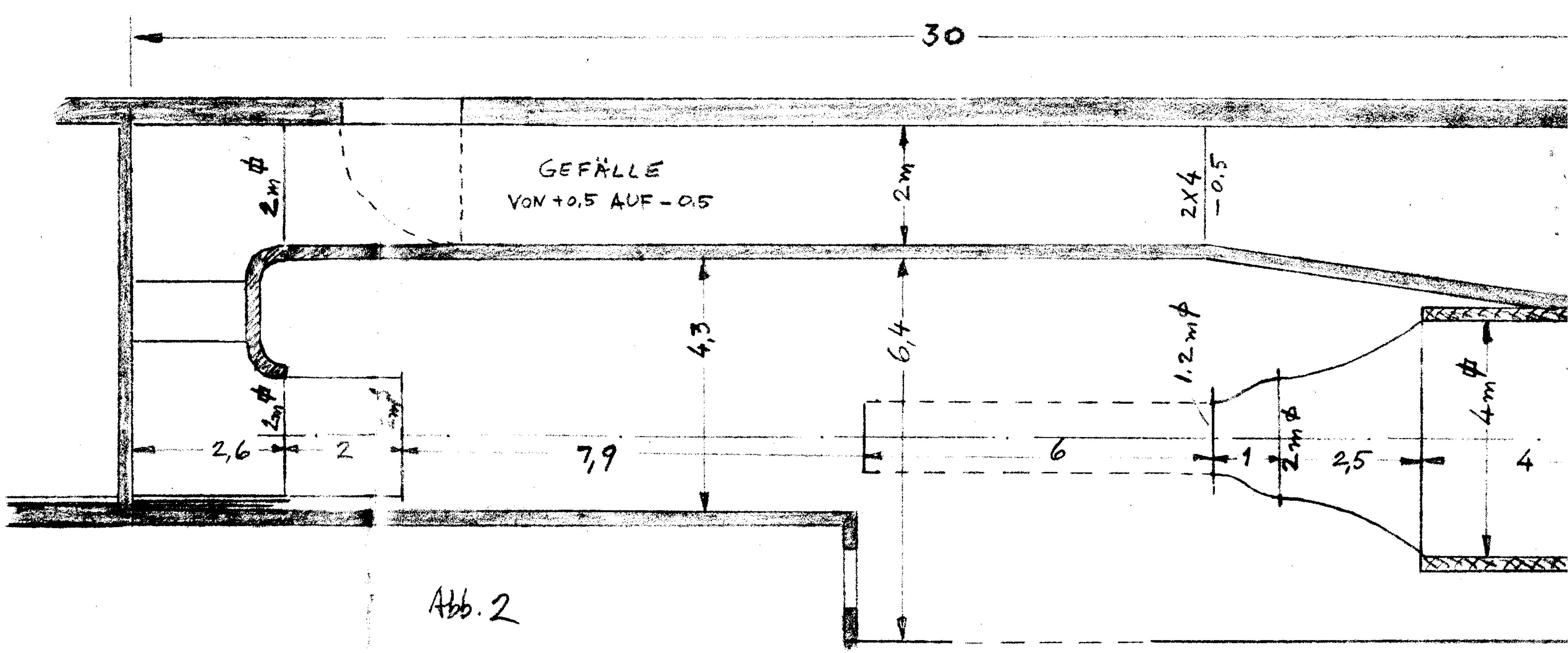

30
2m ø
GEFÄLLE
VON +0,5 AUF -0,5
2m
2x4
-0,5
4,3
6,4
1,2 m ø
2m ø
2,6
2
7,9
6
1
2m ø
2,5
4m ø
4

Abb. 2

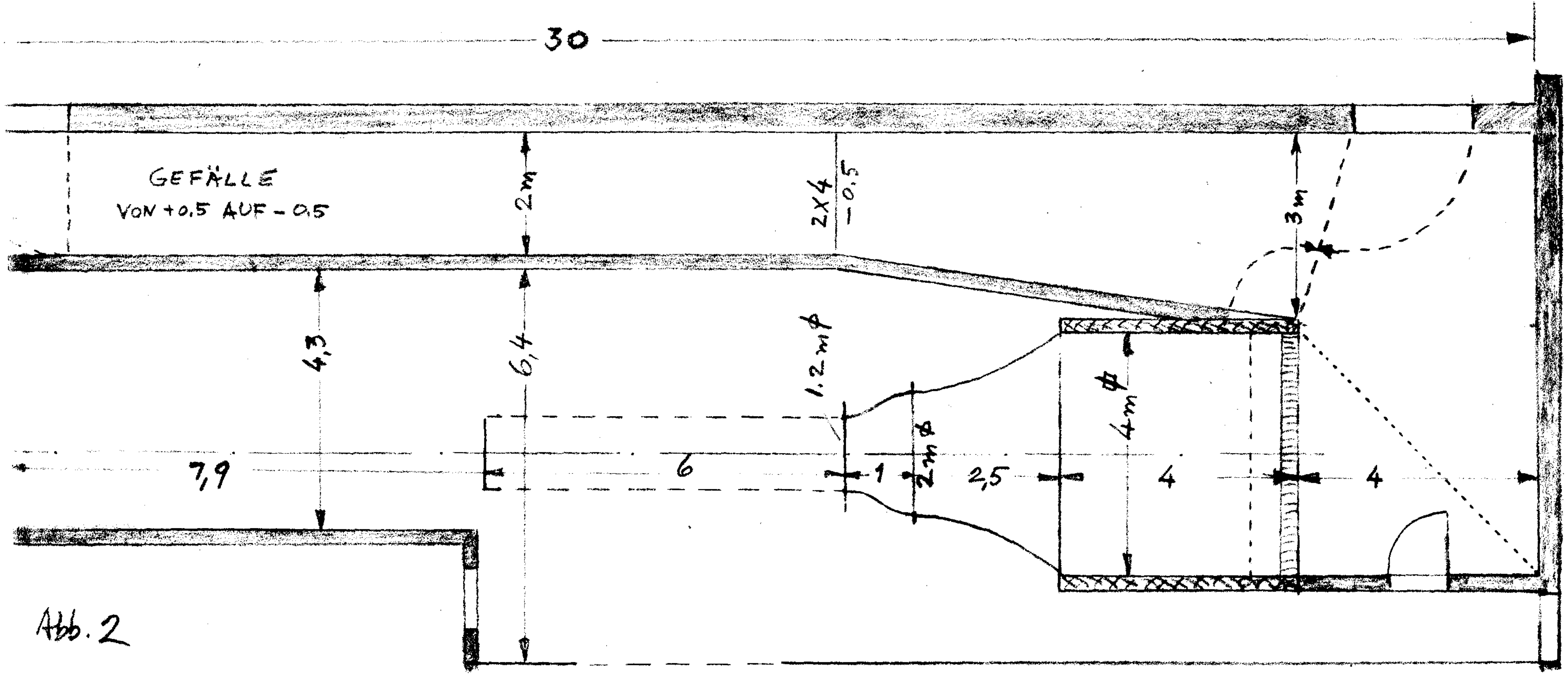


Abb. 2

M 1:100

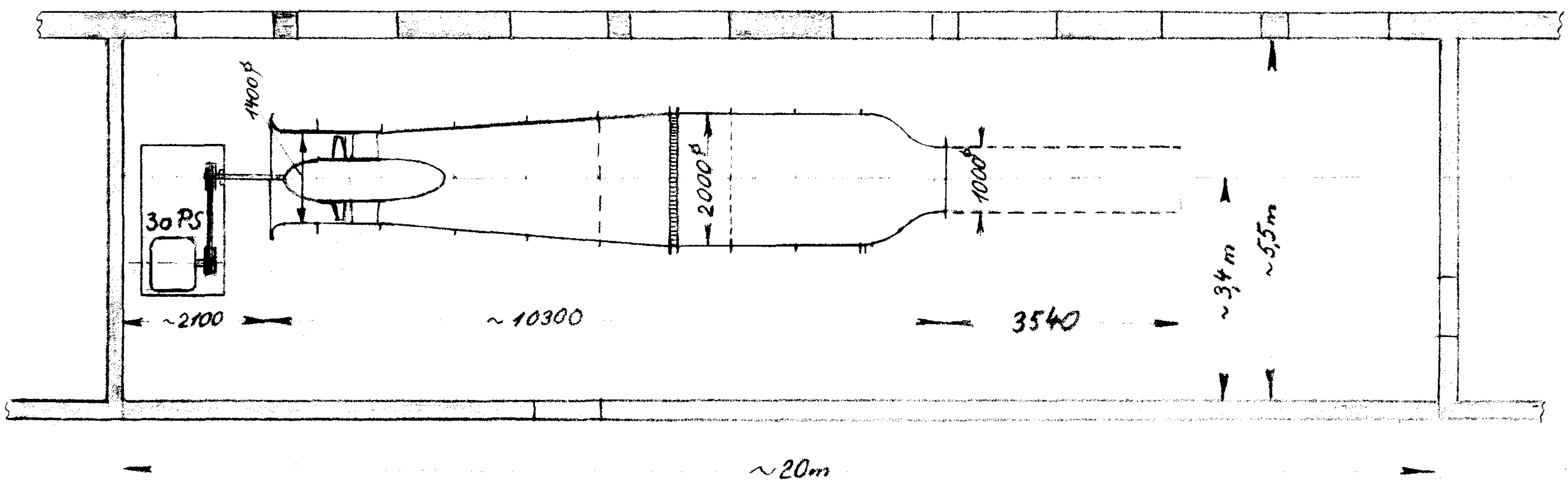
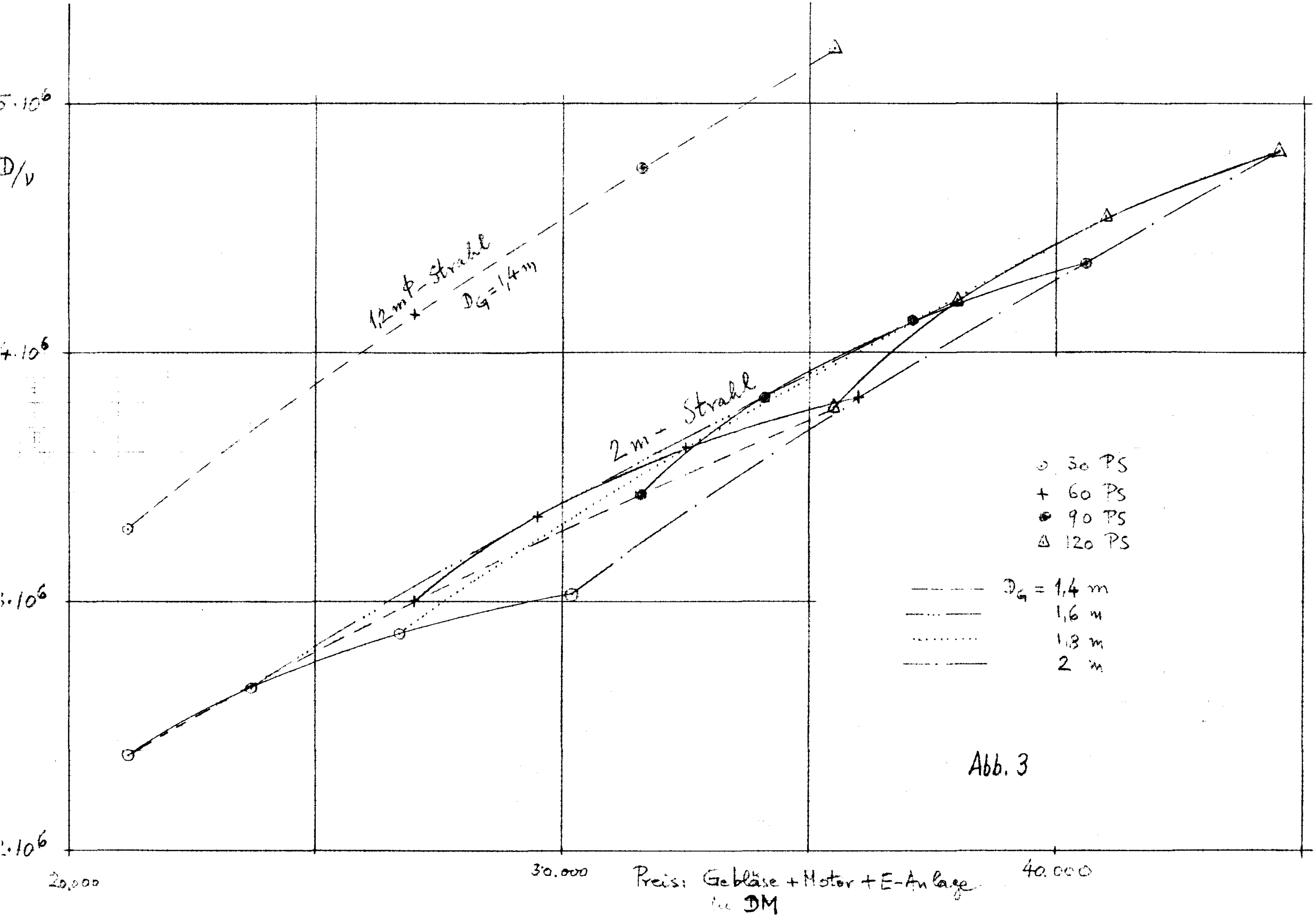
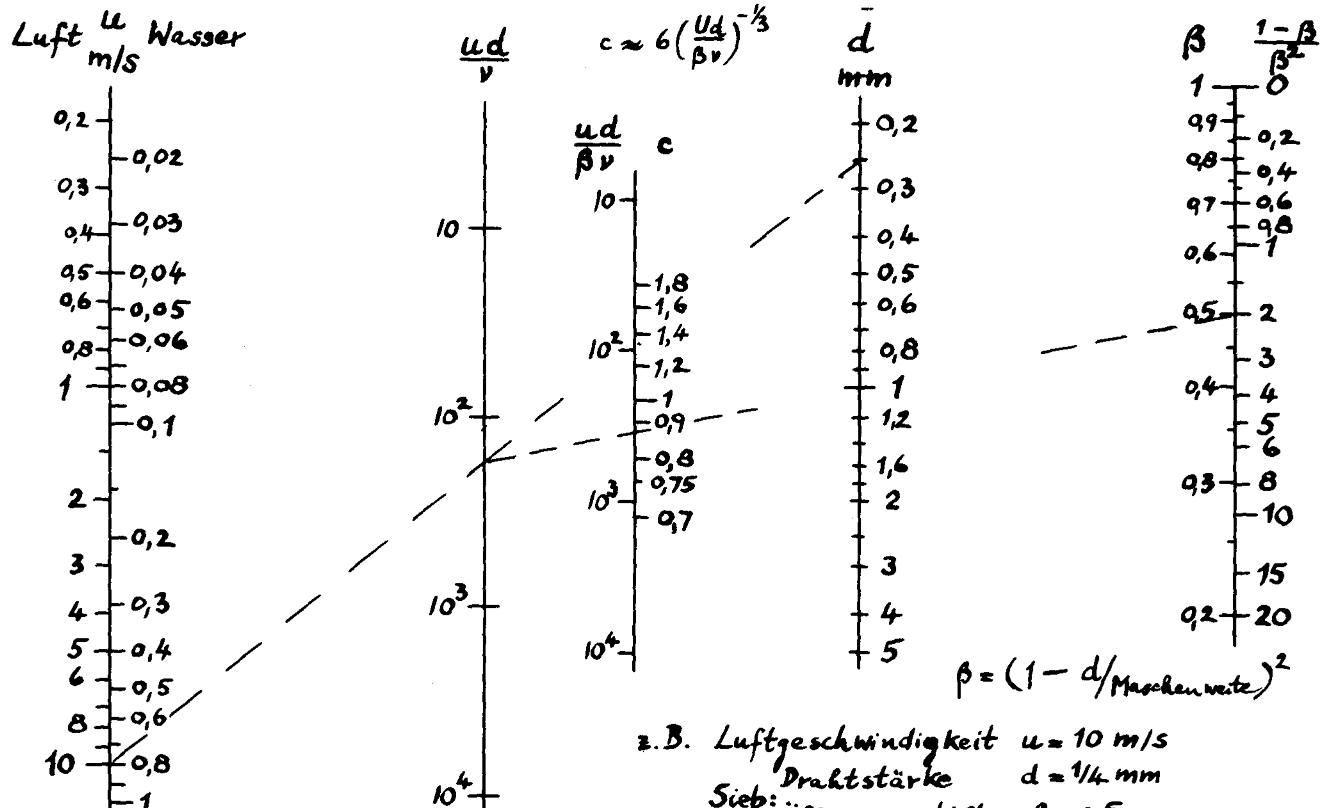


Abb. 1



5·10⁶
D/ν
4·10⁶
3·10⁶
2·10⁶
20.000
30.000
40.000
Preis: Gebläse + Motor + E-Anlage
in DM
12 m Φ - Strahl
D_G = 1,4 m
2 m - Strahl
30 PS
60 PS
90 PS
120 PS
D_G = 1,4 m
1,6 m
1,8 m
2 m

Abb. 3



	Luft	Wasser
ν	$14{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}14 \cdot 10^{-6}$ m²/s
ϱ	0,125	102 Kgs²/m⁴

bei 15 °C.

z. B. Luftgeschwindigkeit $u = 10$ m/s

Sieb: Drahtstärke $d = 1/4$ mm

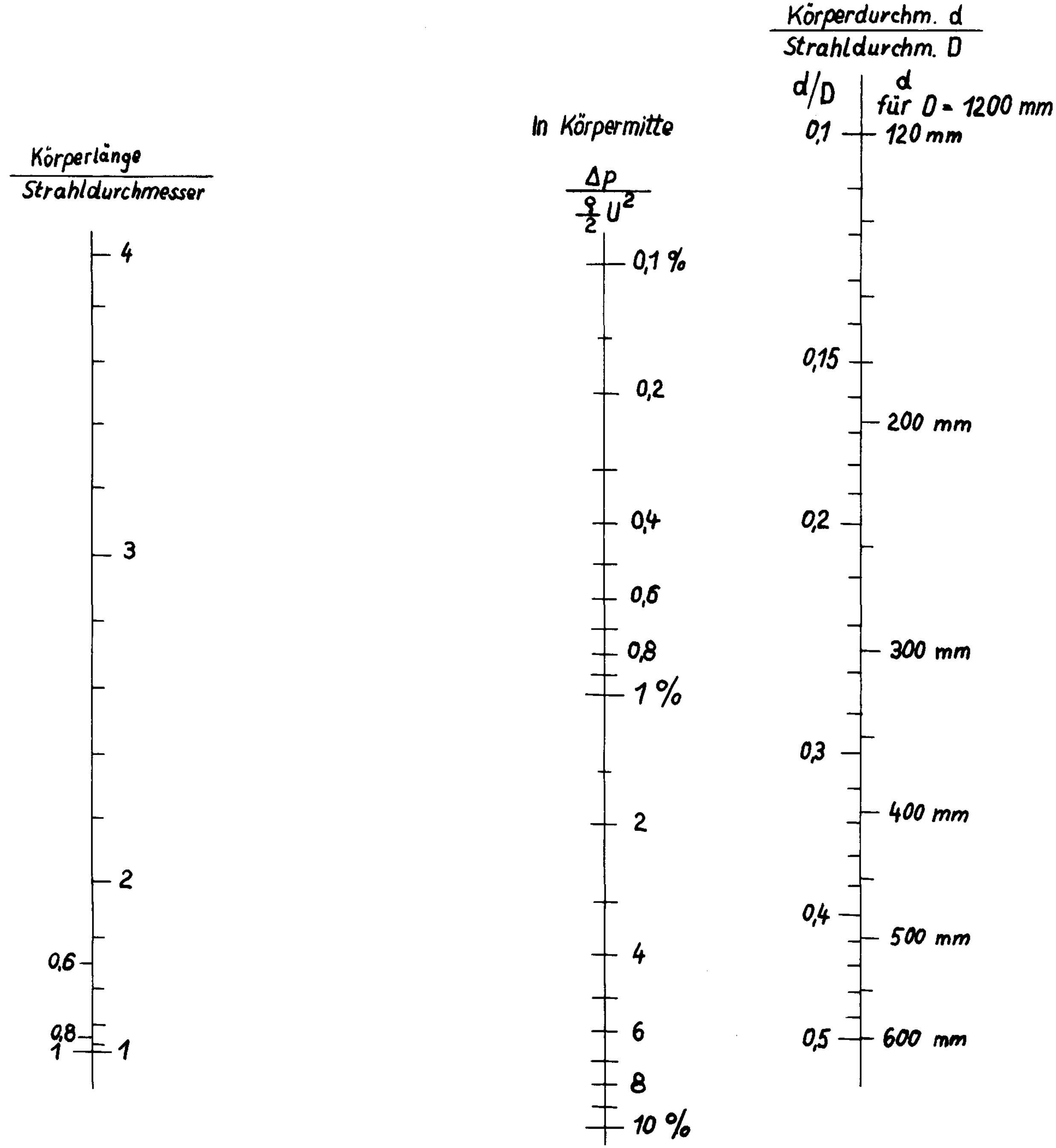
Öffnungsverhältnis $\beta = 0{,}5$.

Aus dem Nomogramm: $c \approx 0{,}87$; $\frac{1-\beta}{\beta^2} = 2$;

also Druckverlust $\frac{\Delta p}{\frac{\varrho}{2} u^2} = \frac{1-\beta}{\beta^2} \cdot c \approx 1{,}7$.

Druckverlust in einem Sieb für Luft- oder Wasserströmung.

Abb. 4



Kanalkorrektur für langgestreckt Rotationskörper im Freistrahl oder Meßkäfig.

$\frac{\varrho}{2} U^2$ = Staudruck der Anströmung.

p = Stat. Druck in Körpermitte in unbegrenzter Strömung.

p_F = Stat. Druck in Körpermitte im Freistrahl oder Meßkäfig.

$p = p_F - \Delta p$.

Abb. 5