

## Der Windkanal am Indian Institute of Science, Bangalore, Süd-Indien

Zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. A. Betz

*Übersicht:* Als Teil eines größeren Erweiterungsprogramms der Versuchseinrichtungen des Instituts für Luftfahrtforschung in Indien wird ein neuartiger Windkanal beschrieben. Ausgehend von den an einen Windkanal zu stellenden Anforderungen wird gezeigt, daß der Leistungsbedarf der gewählten offenen Bauart geringer ist, als er für einen Windkanal mit Lufrückführung sein würde. Es wird dann auf die Bauausführung eingegangen und ausgeführt, daß äußere atmosphärische Störungen, wie Windstöße an der Eintrittsöffnung, wo die Luft mittels Gebläse von der freien Atmosphäre in die Düse des Windkanals gesogen wird, oder an der Austrittsöffnung, wo die Luft an die freie Atmosphäre wieder abgegeben wird, durch eine zweckmäßige Anordnung von Sieben ausgeschaltet werden können. Mit verhältnismäßig geringen Kosten ist ein Windkanal erstellt, der 1. eine sehr gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung in der Meßstrecke hat, bei dem 2. der Turbulenzfaktor praktisch Eins ist und in dem 3. auch Verbrennungskraftmaschinen wie Gasturbinen usw. untersucht werden können.

*Summary:* As a part of a larger expansion program of the Department of Aeronautical Engineering in India a description of a new wind tunnel is given. Starting with the desirable qualities of a wind tunnel it is explained that the power required for an open-circuit wind tunnel is smaller than for the closed-circuit type. It is shown that any disturbances like winds or gusts at the entrance or at the exit of an open-circuit wind tunnel can be eliminated by means of suitable screens. If these screens are placed where the velocity of the air sucked in by the propeller is still very small, little power is required to overcome frictional losses due to the screens. With comparatively small cost a wind tunnel has been built that has 1. a very uniform velocity distribution, 2. a very low turbulence level and 3. the possibility to place also engines and gas turbines in the wind tunnel for testing purposes.

*Résumé:* L'auteur décrit le nouveau type de soufflerie qui fait partie du programme d'équipement assez important de l'Institut de recherches aéronautiques des Indes, destiné à étendre ses installations. Il indique, en partant des conditions à imposer à une soufflerie, que la puissance nécessaire est moindre pour le type choisi, à circuit ouvert, que dans le cas d'une soufflerie «à retour». L'auteur donne ensuite des détails sur la construction réalisée et montre comment, grâce à des filtres convenablement installés, il est possible d'éliminer les perturbations atmosphériques extérieures, comme p. ex. les coups de vents qui se produisent à l'ouverture d'entrée où l'air est aspiré dans la buse au moyen de ventilateurs, ou à l'ouverture de sortie où il est à nouveau évacué dans l'atmosphère libre. Avec des dépenses relativement peu élevées, il a été possible de construire une soufflerie dont: 1<sup>o</sup> la répartition des vitesses dans la chambre des expériences est très constante, 2<sup>o</sup> le facteur de turbulence est pratiquement égal à un, et qui, 3<sup>o</sup> peut aussi servir à faire des essais avec des moteurs à combustion, comme p. ex. les turbines à gaz, etc.

### 1. Einleitung

Nachdem mir im Jahre 1949 die Leitung des Instituts für Luftfahrtforschung am Indian Institute of Science in Bangalore übertragen worden war mit der Aufgabe, die vorhandenen Versuchseinrichtungen wesentlich zu erweitern, stellte im Jahre 1952 die Indische Regierung 1 140 000 Rupien, d. h. etwa 1 Million DM, für diesen Zweck zur Verfügung. Diese Summe wurde so aufgeteilt, daß etwa die Hälfte davon für einen mäßig großen Windkanal, 280 000 DM für Überschallkanäle der intermittierenden Bauart, 140 000 DM für einen Trudelwindkanal und etwa die gleiche Summe für die Erweiterung des Festigkeitslaboratoriums verwendet wurden. Im folgenden soll kurz über den Windkanal berichtet werden.

### 2. Die an den Windkanal gestellten Anforderungen

Von vornherein war anzustreben, daß die Reynoldssche Zahl, bezogen auf die Sehne eines Flugzeugflügelmodells vom Seitenverhältnis 4 : 1, wenigstens von der Größenordnung  $4 \times 10^6$  sein sollte, um oberhalb des kritischen Bereichs zu sein. Als Querschnitt der Versuchsstrecke war ein Rechteck mit abgeschrägten Ecken von der Größe 14 ft  $\times$  9 ft, oder 4,3 m  $\times$  2,75 m gewählt worden, mit einem Querschnitt von 113 sqft = 10,5 m<sup>2</sup>.

Bei einer Spannweite von 8 ft = 2,44 m und dem vorausgesetzten Seitenverhältnis von 4 : 1 ergibt sich eine Profiltiefe von 2 ft = 0,61 m. Um eine Reynoldssche Zahl von beispielsweise  $4 \times 10^6$  zu erhalten, ist somit eine Geschwindigkeit von 100 m/sec erforderlich ( $v = 1,53 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ ). Die Energie in der Meßstrecke ist dann 8400 PS ( $\rho = 0,12 \text{ kg m}^{-3} \text{ sec}^2$ ). Modellversuche des geplanten Windkanals hatten gezeigt, daß sich ein Energieverhältnis von etwa 1:6,5 für die Großausführung erreichen läßt, so daß eine Leistung von 1290 PS bzw.

bei einem Propellerwirkungsgrad von 0,76 eine Motorenantriebsleistung von 1700 PS erforderlich ist.

Der Kostenaufwand hierfür — es handelte sich um zwei von der AEG gelieferte Induktionsmotoren mit Flüssigkeitswiderstand und Kontrolleinrichtung — betrug etwa 190 000 DM. Die Kosten der beiden in Bangalore hergestellten Gebläseschrauben von etwas über 5 m Durchmesser waren etwa 12 000 DM. Für eine Sechskomponentenwaage wurden 80 000 DM sowie für verschiedene Meßeinrichtungen (Betz-Manometer usw.) 8000 DM bereitgestellt, so daß für den eigentlichen Windkanal nur 210 000 DM verblieben.

Welcher Art waren nun — abgesehen von der geforderten verhältnismäßig großen Reynoldsschen Zahl — die weiteren Eigenschaften, die der Windkanal haben sollte? Gewünscht wurden:

1. sehr gleichmäßige örtliche und zeitliche Geschwindigkeit in der Meßstrecke,
2. möglichst große Turbulenzfreiheit,
3. die Möglichkeit, auch Verbrennungskraftmaschinen, Gasturbinen usw. in der Meßstrecke zu untersuchen.

Die erste und zweite Forderung setzt ein sehr großes Kontraktionsverhältnis der Düse voraus, etwa 15 : 1, und damit — bei der üblichen Göttinger Bauart — einen sehr großen und daher kostspieligen Rückführungskanal, besonders auch deshalb, weil der Diffusor von der Meßstrecke bis zur ersten Umlenkschaufelgruppe lang sein muß, wenn man die Energieverluste an dieser Stelle genügend klein halten will, um ein Energieverhältnis des Windkanals von etwa 1 : 6,5 zu ermöglichen. Es ist dann noch zu berücksichtigen, daß die dem Gebläse zugeführte Leistung von 1700 PS die Temperatur der Luft im Windkanal schnell steigen lassen würde, wenn nicht die dieser Leistung entsprechende Wärmemenge pro Zeiteinheit entweder mittels Kühler von sehr großem Querschnitt oder Luftaustausch-Türmen abgeführt wird. Solche Einrichtun-

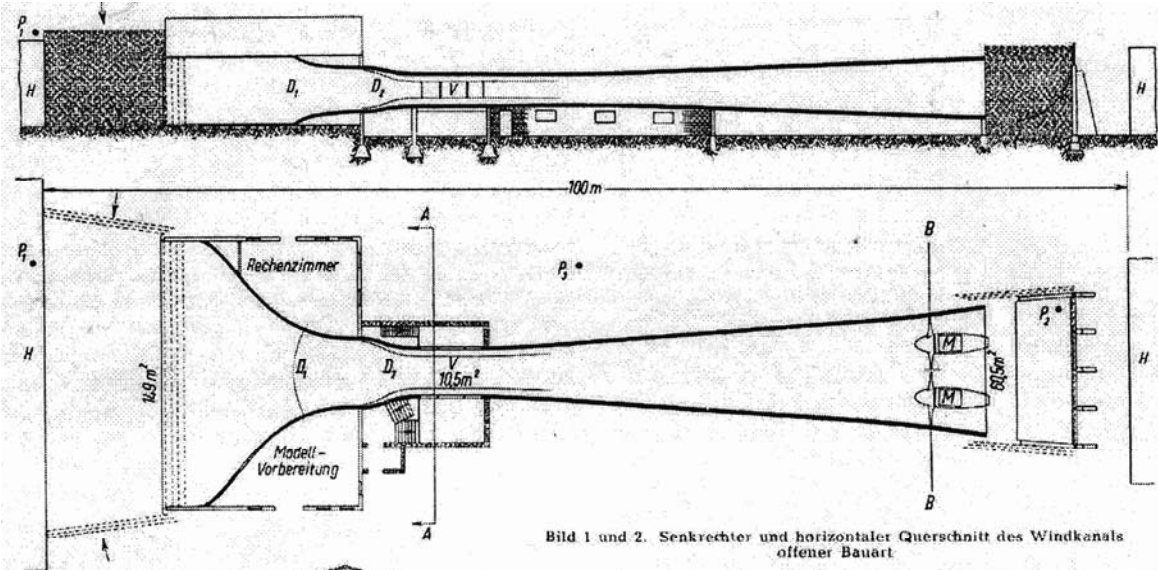


Bild 1 und 2. Senkrechter und horizontaler Querschnitt des Windkanals offener Bauart.

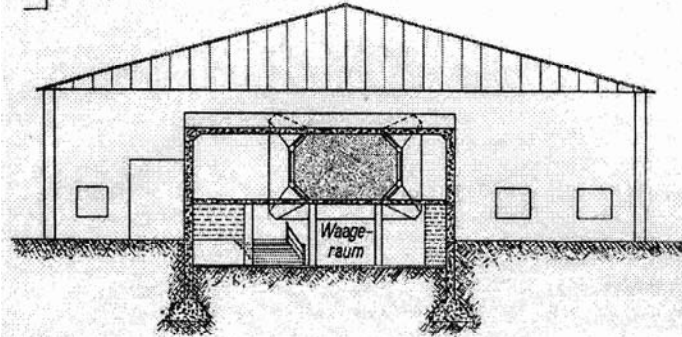


Bild 3. Querschnittsansicht längs A — A von Bild 2 in Richtung von rechts nach links

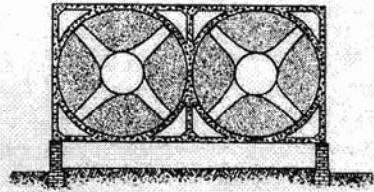


Bild 4. Querschnitt längs B — B von Bild 2

gen sind aber sehr kostspielig, so daß es von vornherein feststand, daß ein so großer Windkanal der Göttinger Bauart nicht für 210 000 DM zu erstellen sei.

Es wurde deshalb eine neue Bauart gewählt, die keinen Rückführungskanal besitzt, sondern bei der die Luft aus der freien Atmosphäre angesaugt und am Ende eines langen Diffusors an diese wieder abgeführt wird. Bei dieser Anordnung läßt sich dann auch die obige unter 3 aufgeführte Forderung leicht erfüllen.

**3. Bauart und Leistungsbedarf des Windkanals**

Bild 1 und 2 zeigen in schematischer Darstellung die gewählte Bauart. Der 86 m lange Windkanal befindet sich zwischen zwei bereits vorhandenen 100 m voneinander entfernten Häusern H. Das Gebläse saugt die Luft am Einlaß zum Windkanal von oben und von den beiden Seiten — hier durch eine Anzahl von Sieben — in den Eintrittsquerschnitt von 24,4 m × 6,1 m = 149 qm. Nachdem die Luft diesen Querschnitt, in dem ebenfalls eine Anzahl von Sieben geeigneter Maschengröße angebracht ist, mit einer Geschwindigkeit von 7 m/sec durchströmt hat, wird sie in den Düsen D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub> bis auf 100 m/sec in der Versuchsstrecke V beschleunigt. Die geschlossene Versuchsstrecke, die wegen der sich ausbildenden Grenzschicht eine geringfügige Zunahme ihres Querschnittes in Strömungsrichtung aufweist (dadurch, daß die Abschragungen der Ecken in Strömungsrichtung geringer werden), führt dann zu dem Diffusor und dem Gebläse. Am Ende des Diffusors wird die Luft an die freie Atmosphäre abgegeben und dort nach oben abgelenkt.

Man findet häufig die Ansicht vertreten, daß der Wirkungsgrad, d. h. das Energieverhältnis der erforderlichen Propellerleistung zur Energie in der Versuchsstrecke, bei der geschlossenen Bauart (mit Rückführung der Luft) günstiger sei als bei der hier gewählten offenen Bauweise, da im ersten Fall, nachdem die Luft erst einmal in Bewegung gesetzt worden ist, nur die Reibungsverluste vom Gebläse aufzubringen seien, während im zweiten Fall dauernd neue Luft aus der Ruhe bis zur Höchstgeschwindigkeit beschleunigt werden muß. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, daß der Wirkungsgrad der offenen Bauweise größer ist als der der geschlossenen Bauweise, unter der Voraussetzung, daß in beiden Fällen die von der Luft durchflossene Strecke die gleiche ist, d. h. die Strecke eines Umlaufs bei der geschlossenen Bauart gleich der Länge des Windkanals der offenen Bauart.

Nach Versuchsergebnissen mit einem Modell (1 : 12) des geplanten Windkanals verteilen sich die Verluste, wenn v die Geschwindigkeit in der Meßstrecke ist, wie folgt:

Energieverluste durch Siebe und in der Düse	Modell <i>Re</i> = 1/36 des Wertes der Großausführung	Großausführung (geschätzt)
bis zur Versuchsstrecke	0,053 $\rho v^2/2$	0,040 $\rho v^2/2$
im Diffusor ( $\eta = 0,89$ )	0,100 $\rho v^2/2$	0,084 $\rho v^2/2$
am Austritt*)	0,030 $\rho v^2/2$	0,030 $\rho v^2/2$
	0,183 $\rho v^2/2$	0,154 $\rho v^2/2$

$$*) = \left( \frac{\text{Versuchsquerschnitt}}{\text{Austrittsquerschnitt}} \right)^2 \frac{\rho}{2} v^2 = \left( \frac{10,5}{60,5} \right)^2 \frac{\rho}{2} v^2$$

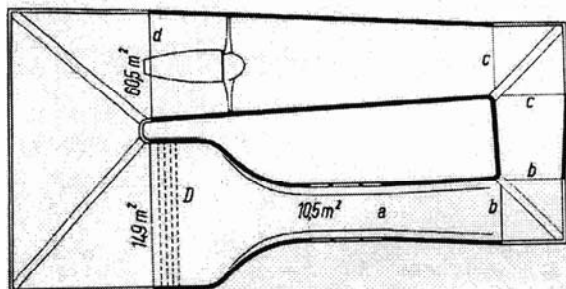


Bild 5. Windkanal mit Rückführung, bei dem die Diffusorteile  $ab + bc + cd$  dem Diffusor des Bildes 1 und 2 entsprechen

Die Gesamtverluste der Großausführung von  $0,154 \rho v^2/2$  entsprechen einem Energieverhältnis von  $1/0,154 = 6,5$ . Vergleicht man diese Verluste mit denjenigen einer geschlossenen Bauart etwa nach Bild 5, wo bei gleicher Düsenkontraktion wie in Bild 1 und 2, nämlich 14,2:1, ein dem Bild 1 und 2 entsprechender Diffusor dazu benutzt wird, die Teile  $ab, bc$  und  $cd$  der geschlossenen Bauweise von Bild 5 zu bilden, so ist folgendes zu sagen:

1. Der Energieverlust durch Siebe, Gleichrichter und Düse wird in beiden Fällen praktisch der gleiche sein.
2. Die Verluste im geraden Diffusor von Bild 1 und 2 werden bedeutend geringer sein als in dem gebrochenen Diffusor  $ab + bc + cd$  von Bild 5.
3. Der Energieverlust am Austritt des Windkanals von Bild 1 und 2 tritt bei dem Windkanal von Bild 5 nicht auf, dafür aber die Verluste vom Querschnitt  $d$  bis zum Eintritt der Düse  $D$ , die mit etwa

$$0,3 [(10,5/60,5)^2 - (10,5/149)^2] \rho v^2/2 = 0,0075 \rho v^2/2$$

zu veranschlagen sind. Dazu treten dann noch die Verluste an den Umlenkschaufelgruppen  $b-b$  und  $c-c$ , wenn die Verluste an den beiden anderen Umlenkschaufelgruppen der Kleinheit wegen vernachlässigt werden.

Der Verlust an den Umlenkschaufeln beträgt etwa  $0,12 \rho v_i^2/2$ , wenn  $v_i$  die Geschwindigkeit an der jeweiligen Umlenkschaufelgruppe  $i$  ist.

In Bild 5 ist die Geschwindigkeit an der ersten Umlenkschaufelgruppe entsprechend dem dort vorhandenen Querschnitt  $0,553 v$  und an der zweiten Umlenkschaufelgruppe  $0,35 v$ , so daß der Verlust an diesen beiden Stellen

$$0,12 (0,553^2 + 0,35^2) \rho v^2/2 = 0,0513 \rho v^2/2$$

ist. Macht man die (zu günstige) Annahme, daß die Verluste in den drei Teilen des Diffusors von Bild 5 die gleichen sind wie die im geraden Diffusor von Bild 1 und 2, so erhält man für die Verluste der Bauart mit Rückführung nach Bild 5

$$(0,04 + 0,084 + 0,0075 + 0,0513) \rho v^2/2 = 0,1828 \rho v^2/2,$$

d. h. ein Energieverhältnis von nur 5,5, verglichen mit 6,5 für die Bauart nach Bild 1 und 2. Man erkennt, daß die Verluste in der ersten Umlenkschaufelgruppe bereits größer sind als die gesamte Energie am Austrittsende des Diffusors von Bild 1 und 2. Man kann zwar die Verluste in der ersten Umlenkschaufelgruppe dadurch geringer machen, daß man die Länge des Diffusors  $ab$  (und  $cd$ ) länger wählt. Dies bedeutet aber eine Verlängerung des gesamten Diffusors, die, auf Bild 1 und 2 angewendet, auch eine entsprechend geringere Austrittsenergie ergäbe.

#### 4. Kurze Beschreibung des Windkanals

Die große Eintrittshalle, in der sich außer der Düse  $D_1$  noch ein Rechenzimmer sowie ein Raum zur Vorbereitung

der Modelle befindet, wurde in Ziegelbauweise ausgeführt. Die Düse  $D_2$ , der Diffusor sowie der die Versuchsstrecke und den Waageraum umschließende Unterdruckraum wurden in Eisenbeton hergestellt. Dabei wurden die Innenflächen der Düsen sowie des Diffusors mit einer Schicht von besonders feinem Zement belegt, glatt abgeschliffen und dann lackiert. Die Versuchsstrecke war in Eisenkonstruktion mit Fenstern aus Plexiglas ausgeführt. Beleuchtet wurde die Versuchsstrecke mittels elektrischer Lampen durch die an den abgeschragten Ecken befindlichen Fenster. Bild 3 zeigt einen Querschnitt des Unterdruckraumes mit der zum Waageraum hinunterführenden Treppe, die zum Beobachtungs- und Kontrollraum heraufführenden Treppen, sowie den Querschnitt der Versuchsstrecke. Bild 4 gibt den Querschnitt des Diffusors an der Stelle der Gebläseanordnung.

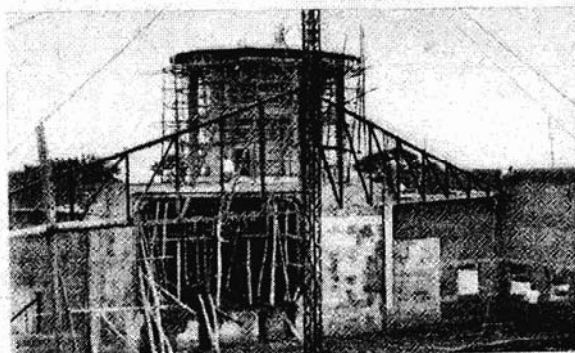


Bild 6. Blick in die Eintrittshalle, aufgenommen von Punkt  $P_1$  des Bildes 1 und 2. Im Hintergrund der im Bau befindliche Trudelwindkanal

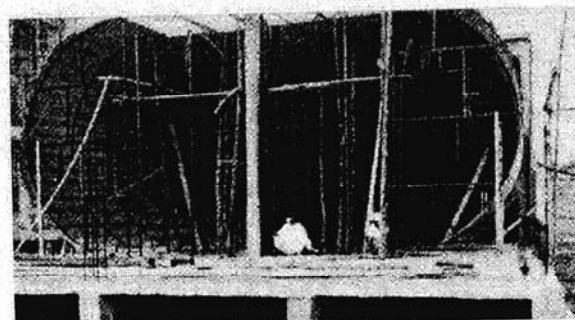


Bild 7. Ansicht des noch unfertigen Diffusors, vom Punkt  $P_2$  des Bildes 2 gesehen

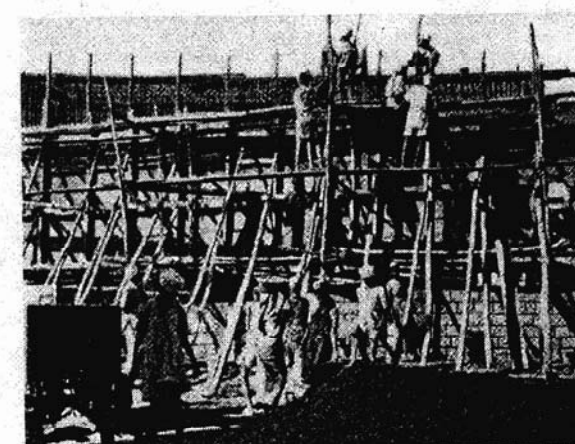


Bild 8. Einfüllen und Einstampfen der Betonmasse, vom Punkt  $P_3$  des Bildes 2 gesehen

Bild 6 zeigt eine Ansicht der noch nicht fertiggestellten Eintrittshalle, in welcher die Düse  $D_1$  noch fehlt. Man erkennt die Öffnung zur Düse  $D_2$ . Die rechts von der Öffnung stehende Eisenkonstruktion dient lediglich zum Heben der eisernen Dachträger. Der Standpunkt der Kamera entspricht etwa dem Punkt  $P_1$  auf Bild 1 und 2. Ein im Hintergrund sichtbarer Turm ist der im Bau befindliche Trudelwindkanal.

Bild 7 ist eine Ansicht des im Bau befindlichen Diffusors etwa von Punkt  $P_2$  des Bildes 2. Es handelt sich auf dem Bild um denjenigen Teil des Diffusors, wo später das Gebläse sein wird.

Bild 8 stellt den Vorgang des Eingießens und Einstampfens der Betonmasse dar, gesehen von Punkt  $P_3$  des Bildes 2. Frauen tragen in Schalen auf ihren Köpfen die Betonmasse auf das Gerüst, das mit seinen schiefen und krummen Stangen recht primitiv ist. Trotzdem ist der fertige Bau schließlich werkgerecht ausgeführt und sieht in jeder Hinsicht ansprechend aus.

Der durchschnittliche halbe Öffnungswinkel des Diffusors beträgt  $3,2^\circ$ .

Beim ersten Entwurf des Windkanals war ein etwas größerer Öffnungswinkel vorgesehen, der dann aber auf Anraten von Herrn Prof. A. Betz verringert wurde.

Als Antrieb dienen zwei Induktionsmotoren von je 850 PS. Die Drehzahl ist in den Grenzen 2:1 stetig vom Versuchsstand einstellbar und wird durch eine elektronen-gesteuerte Kontrolleinrichtung bis auf  $\pm 0,5\%$  konstant gehalten.

Die Motoren sind direkt hinter der Nabe des Gebläses angebracht und stromlinienförmig verkleidet.

Modellversuche haben gezeigt, daß die Geschwindigkeit in der Meßstrecke nicht um mehr als  $\pm 0,5\%$  vom Durchschnittswert abweicht, und zwar auch dann nicht, wenn an der Eintrittsöffnung oder am Austritt des Windkanals Störungen in Form von künstlichem Wind oder Windstößen bis zu Geschwindigkeiten von 50 km/h mittels besonderer Gebläse hervorgerufen werden.

Dieser neue Typ eines Windkanals steht und fällt mit der Möglichkeit, die Wirkung äußerer Windstöße und Wirbel auf die Geschwindigkeitsverteilung in der Meßstrecke auszuschalten. Das läßt sich aber immer durch Benutzung einer genügenden Anzahl von Sieben geeigneter Maschen-größe erreichen. Und wenn dies dort geschieht, wo die vom Gebläse angesaugte Luft noch eine sehr geringe Geschwindigkeit hat, so ist damit auch kaum ein Leistungsbedarf verbunden. Die gewählte Bauart beschränkt sich auf die wesentlichen Elemente eines Windkanals:

1. Düse mit großem Kontraktionsverhältnis zur Erreichung einer gleichförmigen Geschwindigkeit,
2. Versuchsstrecke,
3. Diffusor zur Umwandlung der kinetischen Energie in Druck und
4. die Anordnung von Sieben zur Ausschaltung äußerer atmosphärischer Einflüsse.

Mit verhältnismäßig geringen Kosten ist ein Windkanal erstellt, der den in Abschnitt 2 unter 1 bis 3 erwähnten Anforderungen eines guten und vielseitigen Windkanals in hohem Maße gerecht wird.

(Eingegangen am 3. 11. 1955)