Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 66 (1948)

Heft: 39: Sonderheft zur 48. Generalversammlung der G.e.P.: Luzern, 25./27. September 1948

Artikel: Die Windkanalanlage der kriegstechnischen Abteilung in Emmen (Luzern)

Autor: Hausammann, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-56803

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

66. Jahrgang Nr. 39

Sonderheft zur 48. Generalversammlung der G. E. P.

Luzern, 25./27. September 1948

Die Windkanalanlage der Kriegstechnischen Abteilung in Emmen (Luzern)

DK 533.6.07 (494)

I. Zweck und allgemeine Anordnung

Von Dipl. Ing. W. HAUSAMMANN, Flugzeugwerk, Emmen

Während des letzten Weltkrieges wurde die in der Schweiz ursprünglich nur in geringem Umfang vorhandene Flugzeugindustrie soweit ausgebaut, dass ihre Leistungsfähigkeit genügt, den Eigenbedarf unserer Armee an Flugzeugen zu decken. Diese Massnahme entsprang der Erkenntnis, dass nur die Eigenproduktion die Beschaffung der für die Truppe notwendigen Flugzeuge in kritischen Zeiten sicherzustellen vermag, wobei die selbst hergestellten Maschinen den ausländischen Typen gleicher Klasse qualitativ gleichwertig sein, und überdies den spezifischen schweizerischen Anforderungen genügen müssen.

Um während des zweiten Weltkrieges mit der enormen Entwicklung der Militärflugzeuge im Ausland Schritt halten zu können, war es notwendig, die hierfür erforderlichen Versuchseinrichtungen für die Prüfung und Entwicklung von Triebwerken, sowie für aerodynamische Untersuchungen zu schaffen. Die dringende Notwendigkeit, beim Bau neuer Flugzeuge weitgehend modellmässige Untersuchungen in Windkanälen durchführen zu können, haben deshalb das Militärdepartement veranlasst, den staatlichen Flugzeugwerken in Emmen neben dem Motorenprüfstand eine Windkanalanlage anzugliedern. Diese Anlage soll hauptsächlich der industriellen Zweckforschung dienen, während die Windkanalanlage des Institutes für Aerodynamik an der E.T.H. vorzugsweise der Grundlagenforschung zur Verfügung steht. Im besonderen will man in Emmen die bei der Entwicklung von Düsen- und Raketenflugzeugen (Raketenwaffen) heute und in allernächster Zukunft auftretenden aerodynamischen Probleme möglichst weitgehend abklären, was bei der konstruktiven Gestaltung der Anlage zu berücksichtigen war. Diese Fragen sind sehr umfangreich und vielgestaltig — man denke nur an die Schwierigkeiten, die bei Fluggeschwindigkeiten in der Nähe der Schallgeschwindigkeit, beim Ueberwinden der Schallgrenze und beim Flug mit Ueberschallgeschwindigkeit auftreten. Solche Abklärungen müssen in Hochgeschwindigkeits- und Ueberschallkanälen durchgeführt werden. Vielfach verwendet man auch freifliegende Modelle, was aber messtechnisch nicht einfach und auf die Dauer mit grossen Kosten und Umständen verbunden ist.

Neben diesen eigentlichen Hochgeschwindigkeitsfragen sind bei der Entwicklung rascher Flugzeuge sehr viele und schwierige Probleme bei kleinen Geschwindigkeiten zu lösen, denn die Massnahmen, die bei grossen Geschwindigkeiten mit Vorteil angewendet werden, sind in den meisten Fällen für den Langsamflug ausgesprochen ungünstig. Die Lösung dieser Aufgaben erfordert Windkanäle für mittlere Geschwindigkeiten (bis rd. 100 m/s) mit verhältnismässig grossen Abmessungen. Man strebt dadurch möglichst weitgehende Strömungsähnlichkeiten und die Verwendung von Modellgrössen an, die es erlauben, die Einzelheiten genügend genau nachzubilden, im besondern den Einfluss von Propeller- oder Düsenstrahl durch Einbau von Modelltriebwerken nachahmen zu können.

Für die Untersuchung der oft sehr gefährlichen Vrille- und Trudeleigenschaften der Flugzeuge werden Windkanäle mit vertikalem Luftstrom, sog. Trudelkanäle, verwendet. Hieraus ergibt sich, dass eine sämtlichen Anforderungen und Aufgaben des heutigen Flugzeugbaues genügende aerodynamische Versuchsanlage sich aus Windkanälen mittlerer Geschwindigkeiten, aus Trudelkanälen, sowie aus Hochgeschwindigkeits- und Ueberschallkanälen zusammensetzen muss.

Die Windkanalanlage in Emmen wurde im wesentlichen in diesem Umfang projektiert. Heute ist eine erste Etappe ausgeführt und in Betrieb genommen worden; sie besteht aus einem grossen und einem kleinen Kanal für mittlere Geschwindigkeit, sowie einem Trudelkanal. Der Hochgeschwindigkeitskanal, der gleichzeitig auch als Ueberschallkanal geplant ist, soll in einer zweiten Etappe erstellt werden. Vorgängig müssen jedoch noch verschiedene grundsätzliche Schwierigkeiten der Messtechnik bei hohen Geschwindigkeiten, die hauptsächlich in der Nähe der Schallgeschwindigkeit auftreten, abgeklärt werden.

Bild 1. Fliegerbild der Gesamtanlage, vorn links Maschinenhalle, Mitte kleine Messhalle mit Trudelturm, rechts Bureaugebäude, dahinter grosser Windkanal und Messhalle. Phot. Militärflugdienst

A. Grosser Windkanal

Die Grösse dieses Windkanals ergab sich aus folgenden zwei Forderungen: Die Abmessungen der Messstrecke mussten so gewählt werden, dass Untersuchungen von vollständigen Flugzeugmodellen mit eingebauten Modelltriebwerken, sowie naturgrossen Flugzeugteilen wie Leitwerken, Propeller, usw. durchgeführt werden können. Die grösste Luftgeschwindigkeit in der Messstrecke musste so gewählt werden, dass sich überkritische Reynolds'sche Zahlen von mehreren Millionen ergaben. Durch die Möglichkeit, den grossen Kanal sowohl mit offener als auch mit geschlossener Messtrecke betreiben zu können, sind die Vorteile beider Kanalarten vereinigt, so dass er allen in Frage kommenden Anforderungen bei mittleren Geschwindigkeiten (kleine

Machsche Zahlen) genügt. Der Messquerschnitt misst 7 × 5 m; er kann durch Entfernen der Vorsatzdüse auf 6 × 8 m erweitert werden. Die grösste Strahlgeschwindigkeit beträgt 80 m/s.

B. Kleiner Windkanal

Dieser Kanal weist eine offene Messtrecke auf und wird hauptsächlich zur Durchführung von allgemein orientierenden Messungen, Strömungsbeobachtungen, Schwingungsuntersuchungen usw. benützt. Er wird auch überall da verwendet, wo die Benützung des grossen Windkanals unwirtschaftlich wäre. Sein Messquerschnitt beträgt 2,45 × 1,75 m, die grösste Strahlgeschwindigkeit 60 m/s.

C. Trudelwindkanal

Die offene Messtrecke mit vertikal nach oben blasendem Strahl weist einen kreisförmigen Messquerschnitt von 3 m ∅ auf, die grösste Strahlgeschwindigkeit beträgt 30 m/s. Dieser Kanal ist baulich mit dem kleinen Kanal kombiniert und arbeitet mit der gleichen Antriebsmaschine und mit dem gleichen Gebläse. Diese Lösung ergab kleine Erstellungskosten und konnte gewählt werden, weil der Trudelkanal verhältnismässig wenig benützt wird. Die Untersuchungen, die darin zur Durchführung gelangen, dienen hauptsächlich der Abklärung des Trudelverhaltens und der Vrille-Eigenschaften der Flugzeuge; sie werden mit geometrisch und dynamisch dem Flugzeug ähnlichen Modellen vorgenommen.

D. Verschiedenes

Neben diesen drei Windkanälen gehören zur Versuchsanlage die eigentlichen Messhallen, das Modellager, die Maschinenhalle mit den Antriebsaggregaten und der elektrischen Ausrüstung sowie der Bürotrakt. Für die Herstellung der Modelle und Versuchseinrichtungen ist eine Schreinerei und eine mechanische Werkstätte vorhanden, die in einem besonderen Bau untergebracht sind. Es war nicht leicht, eine möglichst zweckmässige Anordnung und Aufteilung des Gesamtbaues bei Beschränkung der schon durch die Natur der Sache gegebenen ungewöhnlich grossen Dimensionen auf das absolut notwendige Mass zu erhalten. Dabei musste auf günstige Lichtverhältnisse und Vermeidung von Lärmbelästigung geachtet werden.

Aber nicht nur für die Baufirma, sondern auch für die Lieferwerke der technischen Ausrüstungen war es kein Leichtes, die gestellten Forderungen zu erfüllen. Das gegenläufige Gebläse von 8,5 m Durchmesser des grossen Windkanals stellt eine Spitzenleistung unserer Maschinenindustrie dar; die grosse Reguliergenauigkeit der elektrischen Anlage verdient ebenfalls hervorgehoben zu werden. Ferner muss die vollständige Neuentwicklung der automatisch regulierenden Sechskomponentenwaagen für den grossen und kleinen Windkanal besoders erwähnt werden. Die gesamte Anlage ist auf Grund eines Vorprojektes des Flugzeugwerkes Emmen ausschliesslich von Schweizerfirmen projektiert und gebaut worden; sie stellt der Leistungsfähigkeit unserer Industrie ein gutes Zeugnis aus.

Die Erstellung wurde von der KTA an eine Arbeitsgemeinschaft vergeben, in der Escher Wyss die federführende Leitung übernahm und die aus folgenden Firmen bestand:

Escher-Wyss AG., Zürich	Gebläse und maschinelle Ausrüstung, Formgebung der Kanäle
Maschinenfabrik Oerlikon	Elektrische Maschinen und Ausrüstung
Locher & Cie., Zürich	Bauprojekt und Ausführung
Engler & Cie., Zürich Ingenieurbüro Graemiger	Sechskomponentenwaagen

Vorgängig dem eigentlichen Bau und während der Projektausarbeitung wurde ein Modellkanal des grossen Windkanals im Masstab 1:10 erstellt und daran sämtliche Fragen der Formgebung von Düse, Diffusor, Messtrecke, Umlenkecken usw. studiert und abgeklärt. Mit dem Bau konnte am 15. Juni 1944 begonnen werden. Die Kanäle kamen erstmalig im Januar 1946 in Betrieb; nach Durchführung der notwendigen Eichungen ist die gesamte Anlage seit Mai 1947 betriebsbereit.

Die Anlage in Emmen wurde von der KTA der gesamten schweizerischen Flugzeugindustrie und nach Möglichkeit auch weiteren Industriezweigen, in denen aerodynamische Probleme zu lösen sind, verfügbar gemacht. Bereits verdankt man den in Emmen durchgeführten Untersuchungen wertvolle Ergebnisse bei der Ausarbeitung von schweizerischen Düsenflugzeugprojekten, und es mag an dieser Stelle die Hoffnung ausgesprochen werden, dass das hier Geschaffene seinen Sinn und seine Berechtigung auch in Zukunft bewahre, was nur im Rahmen einer planmässigen Eigenentwicklung von Flugzeugen der Fall sein kann.

II. Aufbau und mechanische Ausrüstung der Kanäle

Von Dipl. Ing. W. GAEHLER, Escher Wyss AG., Zürich

Der grosse und der kleine Windkanal entsprechen im Aufbau dem Typ des Göttinger Windkanals (auch deutscher Typ genannt) mit horizontal liegenden Kanalaxen. Das Kennzeichen dieser Kanäle ist der geschlossene Luftkreislauf, wobei die Messtrecke selbst geschlossen oder offen sein kann. Beim geschlossenen Kreislauf (Bild 2) wird die Luft nach Durchströmen der Messtrecke wieder aufgefangen und dem Gebläse zugeführt, so dass im Prinzip immer die selbe Luft zirkuliert. Der grosse Vorteil dieser Bauart besteht in der weitgehenden Ausnützung der kinetischen Energie der umlaufenden Luft, so dass das Gebläse nur die Verluste decken muss, welche die Luft längs ihrem Weg erleidet. Damit kann bei einer gegebenen, verfügbaren Antriebsleistung ein Maximum an Strahlenergie erreicht werden. Weiter bleibt hierbei der Zustand der Luft im Messtrahl praktisch unabhängig von der Witterung, im Gegensatz zu den offenen Windkanälen vom Eiffel-Typ nach Bild 3, bei denen die Luft vom freien Raum angesaugt und wieder dorthin geblasen wird. Naturgemäss ergibt die Göttinger Bauart einen im Verhältnis zum Strahlquerschnitt grossen Platzbedarf mit entsprechend hohen Anlagekosten.

A. Vorarbeiten

In der Fachliteratur sind Beschreibungen vieler ausländischer Kanäle zu finden. In den weitaus meisten Fällen handelt es sich aber um Angaben über die von den betreffenden Kanälen erwarteten Leistungen; nur vereinzelt sind Messergebnisse veröffentlicht. Ferner variieren die an die verschiedenen Kanäle gestellten Anforderungen in weitem Bereich und dementsprechend auch die angewendeten Bauarten. Der Auftrag zur Verwirklichung der Anlage in Emmen wurde mitten im Krieg erteilt, sodass es nicht möglich war, im Ausland brauchbare Erfahrungen im Bau grosser Windkanäle zu sammeln. Unter diesen Umständen war es durchaus am Platz, vom geplanten grossen Windkanal zuerst ein Modell im Masstab 1:10 herzustellen, und es im Laboratorium zu untersuchen.

Der Modellkanal war aus Holz gebaut worden, so dass mit verhältnismässig geringen Mitteln weitgehende Aenderungen vorgenommen und jene Formen und Abmessungen gefunden werden konnten, die für die Grossausführung den besten Wirkungsgrad und den günstigsten Kanalfaktor erwarten liessen. Unter Kanalfaktor k versteht man das Ver-

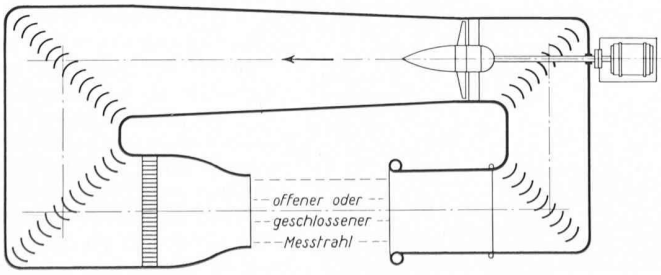

Bild 2. Prinzipskizze einer Anlage mit geschlossenem Kreislauf, Göttinger Bauart

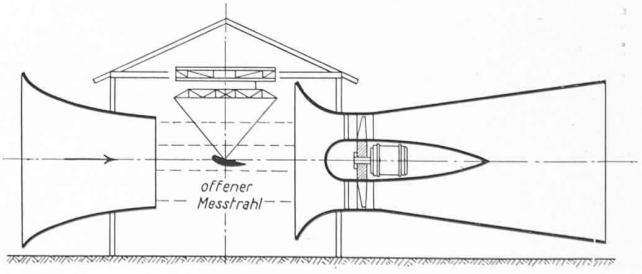

Bild 3. Prinzipskizze einer offenen Anlage, Effeltyp

hältnis der Strahlenergie zur Energie, die dem Gebläse an der Kupplung zugeführt wird, also:

$$k = \frac{\gamma}{2g} \frac{c^2}{75} \frac{V}{N}$$

wobei:

γ = spez. Gewicht der Luft im Strahl in kg/m³
c = Luftgeschwindigkeit im Strahl in m/s
V = Luftmenge in m³/s
N = Antriebleistung an der Gebläsekupplung in PS

Die Untersuchungen am Modellkanal wurden durch eine Reihe von Einzelversuchen mit separaten Holzmodellen ergänzt und unterstützt. Die Durchführung der Versuche war dadurch erschwert, dass die Windkanäle mit kurzer Lieferfrist und ungefähr im selben Moment bestellt wurden, da der Modellkanal für den Beginn der Versuche bereit stand. Die definitiven Baupläne mussten deshalb schon ausgearbeitet werden, als die Versuche noch in vollem Gang waren.

B. Grosser Windkanal

Die Konstruktion der meisten Teile der mechanischen Ausrüstung weicht von den Ausführungen bei den bisher bekannten Kanälen mehr oder weniger stark ab; sie sei deshalb nachstehend kurz beschrieben.

1. Das Gebläse (Bild 5)

Obschon zur Erzeugung der benötigten Druckerhöhung ein einstufiges Gebläse mit vor- oder nachgeschaltetem Leitapparat genügt hätte, wurde beim grossen Windkanal die zweistufige Bauart mit gegenläufigen Rädern gewählt, und zwar aus folgenden Gründen: Die vom Gebläse zu erzeugende Druckerhöhung ist von den Strömungsverlusten im Kanal abhängig. Wie eingangs erwähnt, kann der grosse Windkanal wahlweise mit offener oder mit geschlossener Messtrecke betrieben werden. Nun sind die Strahlverluste bei der offenen Messtrecke grösser als die bei der geschlossenen, so dass das Gebläse alsdann eine grössere Druckerhöhung erzeugen muss. Wieder anders sind die Verhältnisse bei Betrieb ohne Vorsatzdüse, d. h. beim grössten Strahlquerschnitt. Die Strömung der Luft nach einem Axialgebläse mit festem Leitapparat ist nur im Berechnungspunkt axial gerichtet, also nur bei *einer* bestimmten Druckerhöhung. Bei allen anderen Betriebsverhältnissen ist sie mit einem Drall behaftet. Bei Leitapparaten, die dem Laufrad nachgeschaltet sind, wird dieser Drall nur zum Teil aufgehoben. Dieser Nachteil könnte teilweise durch drehbare Leitschaufeln behoben werden, was aber bei den vorliegenden Abmessungen eine reichlich komplizierte Konstruktion erfordert hätte.

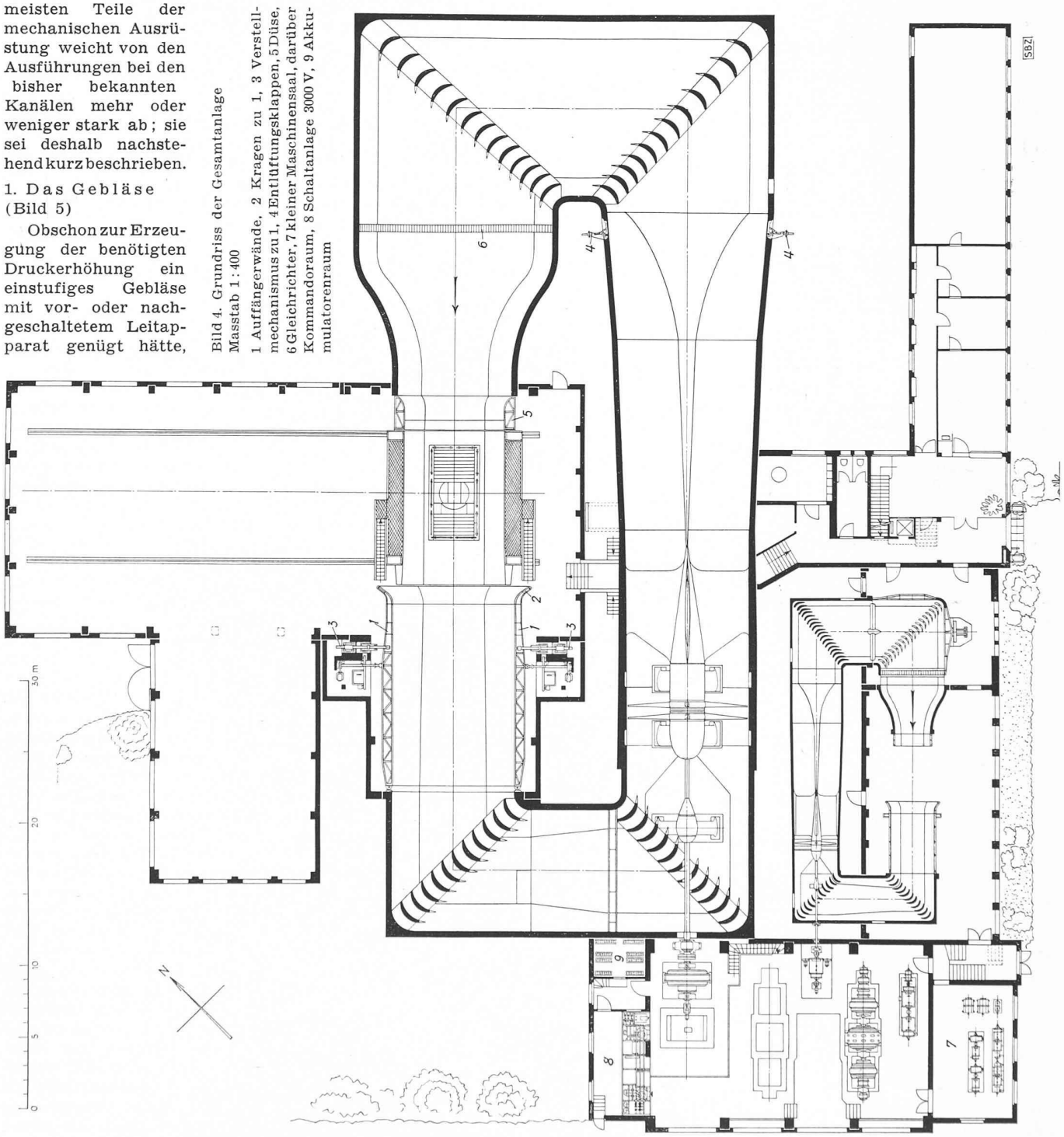

Bild 4. Grundriss der Gesamtanlage
Masstab 1:400
1 Auffängerwände, 2 Kragen zu 1, 3 Verstellmechanismus zu 1, 4 Entlüftungsklappen, 5 Düse, 6 Gleichrichter, 7 kleiner Maschinensaal, darüber Kommandoraum, 8 Schaltanlage 3000 V, 9 Akkumulatorenraum

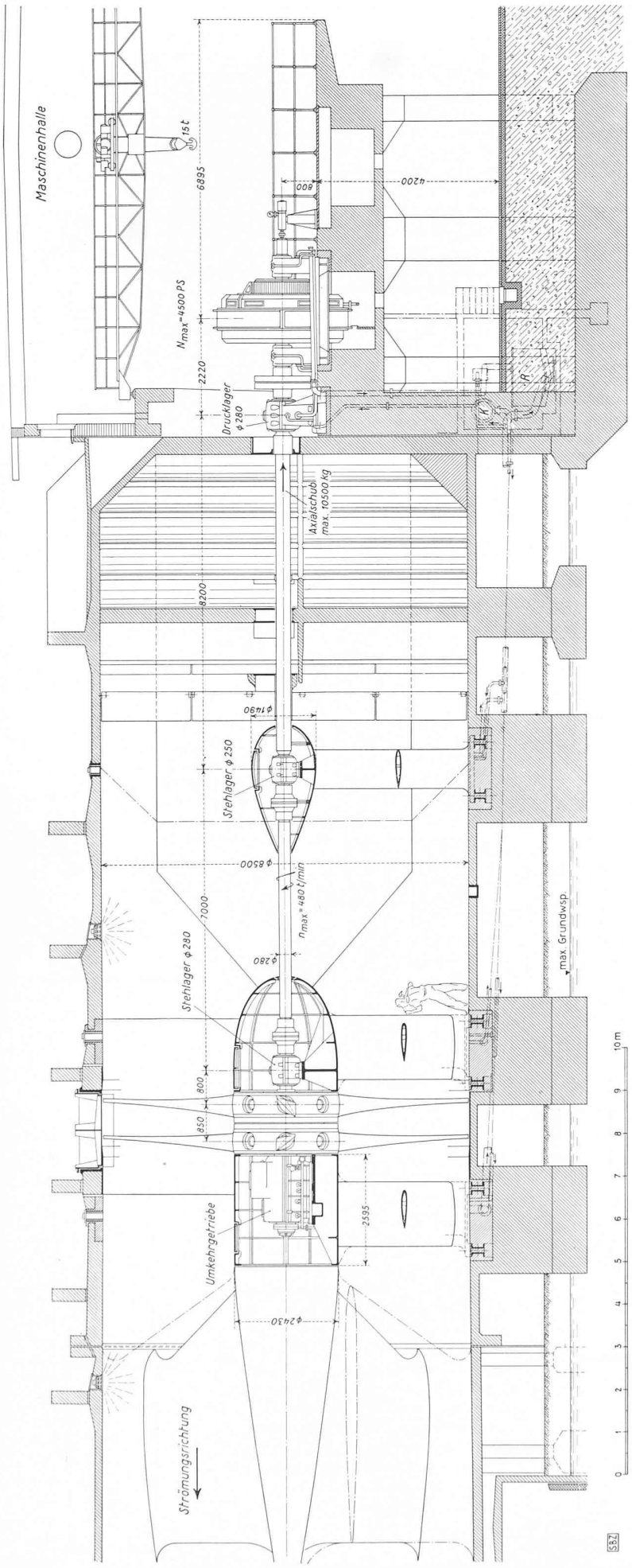

Bild 5. Gebläse für den grossen Windkanal mit Antrieb. Masstab 1:135. K Oelkühler, R Oelreservoir

Demgegenüber arbeiten zwei gegenläufige Laufräder ähnlich wie ein Laufrad mit automatisch verstellbaren Leitschaufeln; die Strömung hinter dem zweiten Rad ist in weitem Bereich praktisch axial gerichtet. (In jedem Betriebspunkt über den ganzen Querschnitt genaue axiale Abströmung könnte nur mit Flügeln erreicht werden, deren Verwindung verändert werden kann, eine Konstruktion, die vielleicht einmal möglich wird, deren Kosten jedoch kaum in verantwortbarem Verhältnis zum praktischen Nutzen sein werden.) Diese vorteilhafte Eigenschaft der gegenläufigen Räder war auch deshalb wertvoll, weil die wirklich benötigte Druckerhöhung durch den Modellversuch nur annähernd bestimmt werden konnte. Wohl kann die Aufwertung der Grossausführung gegenüber dem Modell infolge der grösseren Reynolds'schen Zahl berechnet werden. Unbekannt bleiben jedoch die Genauigkeit der Herstellung des Kanals in Beton, sowie die wirkliche Rauhigkeit der Betonwände, umsomehr als vorgesehen war, den Betonkanal schalungsroh zu belassen.

Die vom Gebläse zu erzeugende Druckerhöhung kann ebenfalls ändern, wenn z. B. ein Modell mit besonders grossem Widerstand untersucht wird. Um auch in solchen Fällen mit dem Gebläse anpassungsfähig zu sein, wurde die Konstruktion der Laufräder so gewählt, dass der Anstellwinkel der Flügel bei stillstehender Maschine verändert werden kann.

Die Laufräder weisen einen Durchmesser von 8,5 m auf. Die vollständig aus Stahlguss bestehenden Naben haben ein Gewicht von je 11 t. Jedes Rad trägt acht Flügel aus Elektronguss. Bild 6 zeigt den Abströmkonus mit seinen Streben und dahinter das zweistufige, gegenläufige Gebläse.

Der Gleichstrommotor treibt das Gebläse über eine elastische Kupplung direkt an, Bild 5. Das erste Laufrad ist auf der vierfach gelagerten Welle aufgekeilt. Das erste Traglager befindet sich auf dem Motorfundament der Maschinenhalle, also noch ausserhalb des Kanals und ist mit einem Drucklager kombiniert, das den Axialschub der Laufräder aufnimmt. Das zweite und dritte Traglager werden von kräftigen Böcken aus Grauguss getragen. Das vierte Lager befindet sich auf der Abströmseite des Gebläses und ist im Umkehrgetriebe eingebaut. Dieses dient zum Antrieb des Laufrades der zweiten Stufe, das mit umgekehrter Drehrichtung, jedoch mit gleicher Drehzahl wie das der ersten Stufe umläuft. Es wird von einem kräftigen Bock aus Grauguss getragen, an den der Abströmkonus anschliesst. Die Nabe des ersten Laufrades sitzt auf einer vollen Welle, jene des zweiten auf einer Hohlwelle.

Ein besonderes Problem stellte die Schmierung dar, weil ausser dem antriebseitigen Lager alle andern Lager während des Betriebes nicht zugänglich sind. Die Lager erhielten eine kombinierte Pressöl- und Ringschmierung. Die letztgenannte genügt bei kleinen Drehzahlen und im Auslauf. Bei höheren Drehzahlen und zur Erneuerung des Oeles in den Lagern dient die zusätzliche Pressölschmierung. Diese Kombination sichert die Schmierung während der langen Auslaufzeit, mit der wegen den grossen rotierenden Massen zu rechnen war, sowie auch bei Versagen der Pressölzufuhr.

Die Hauptölpumpe konnte nicht, wie sonst üblich, mit der Gebläse- oder der Motorwelle gekuppelt werden, weil sich diese 6 m über dem Boden befinden. Die Saughöhe von einem auf Bodenniveau stehenden Oelreservoir zur obenliegenden Oelpumpe wäre viel zu gross. Anderseits war die Aufstellung eines Oelreservoirs auf der Höhe des Motors auch nicht zweckmässig, weil die Oel-Zu- und Abflüsse durch die hohen

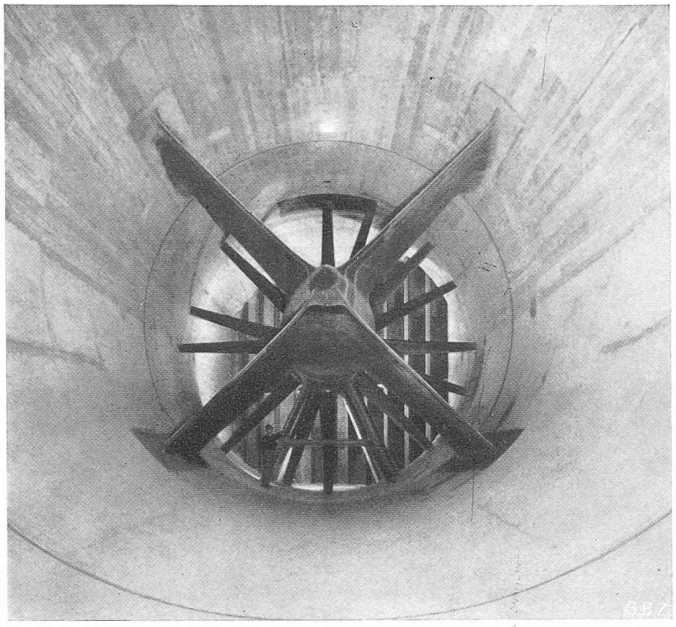

Bild 6. Grosser Windkanal mit Gebläse. Vorn Abströmkonus, dahinter die beiden achtflügligen Propeller, hinten Umlenkschaufelgitter

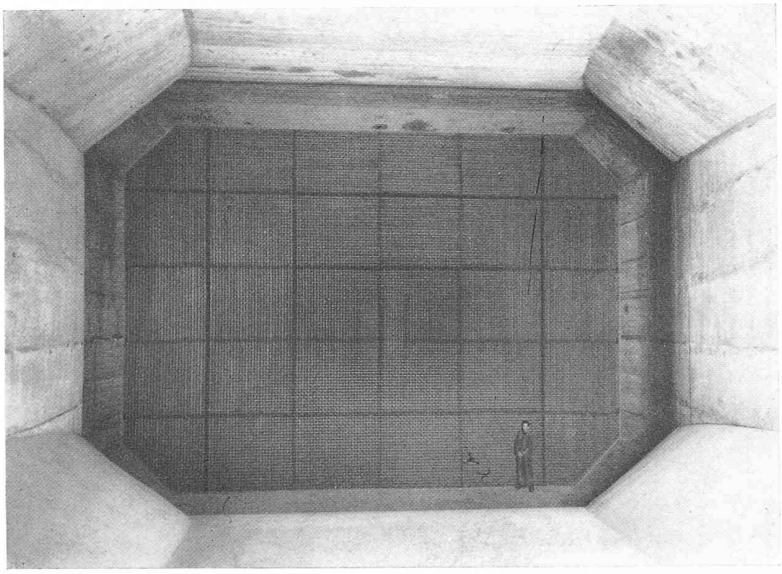

Bild 7. Gleichrichter vor der Düse des grossen Windkanals

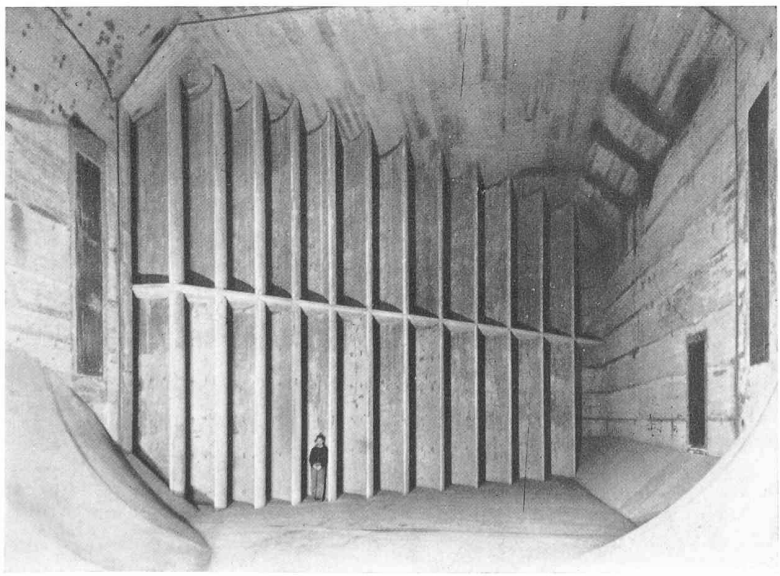

Bild 8. Umlenkecke des grossen Windkanals, Ausströmseite. In den beiden Seitenwänden Entlüftungsklappen, rechts Einsteigtüre

Streben der Lagerböcke aus dem Kanal heraus und dem Kanalboden entlang geführt werden mussten, so dass das Oelreservoir durch kommunizierende Röhren mit den Lagern verbunden gewesen wäre. Nun war aber damit zu rechnen, dass der Windkanal während der kalten Jahreszeit einige Tage stillgelegt bleibt, so dass das Oel in den unter Aussentemperatur liegenden Röhren sehr dickflüssig geworden, wenn nicht gar erstarrt wäre.

Diesen Schwierigkeiten wurde dadurch begegnet, dass das Oelreservoir R (Bild 5) in einem kleinen Raum unter Kanalbodenhöhe aufgestellt wurde, derart, dass das Oel von den Lagern frei in dieses zurückfliessen kann. Im selben Raum befindet sich die von einem Drehstrommotor angetriebene Hauptölpumpe, die das Frischöl durch den Oelkühler K in die Lager und in das Getriebe presst. Sollte aus irgend einem Grunde das Drehstromnetz ausfallen, so übernimmt eine Hilfsölpumpe die Förderung des für den Auslauf nötigen Oeles. Die Hilfsölpumpe wird von einem Gleichstrommotor angetrieben, der an das von einer Akkumulatorenbatterie gespiesene Notstromnetz angeschlossen ist. Mit der im Oelreservoir eingebauten elektrischen Heizung kann das Oel bei kaltem Wetter vorgewärmt werden.

Der Abströmkonus wird von vier radialen Streben im Betonkanal gehalten. Konus und Streben bestehen aus einem Profileisengerüst, das mit Rabitzverputz verkleidet ist.

2. Die Entlüftungsklappen

Um die Luft im Kanal erneuern zu können, sind am Ende des Diffusors nach dem Gebläse an den seitlichen Wänden Entlüftungsklappen 4 (Bild 4) angebracht. In dieser Kanalpartie herrscht bei Betrieb des Kanals immer ein Ueberdruck gegenüber der Aussenluft, so dass die verbrauchte Luft bei geöffneten Klappen ins Freie abströmt. Dabei entsteht in der Messtrecke ein Unterdruck, durch den frische Ersatzluft aus der grossen Messhalle angesaugt wird.

3. Der Gleichrichter (Bild 7)

Vor der Düse, wo die kleinste Geschwindigkeit herrscht, ist der Gleichrichter untergebracht. Das Verhältnis der Maschenweite zur Maschentiefe beträgt 1:6. Solche Gleichrichter werden üblicherweise aus Blech gebaut. Im vorliegenden Fall wären aber rd. 50 t Blech nötig gewesen, und zwar zu einer Zeit, da Blech sehr knapp und kontingentiert war. Aus diesem Grund hat man eine Konstruktion aus Sperrholzzellen angewendet und die einzelnen Sperrholzwaben von rd. 2000 × 2300 mm in ein Netz aus Blech gleicher «Maschenweite» eingeschoben.

4. Die Düse

Die Düse besteht aus zwei Teilen: Der Betondüse mit einem engsten Querschnitt von 6 × 8 m und der Vorsatzdüse mit einem engsten Querschnitt von 5 × 7 m, mit der normalerweise gefahren wird. Diese besteht aus einem aus Profileisen zusammengeschweissten Tragwerk, das luftseitig mit Holz beplankt wurde (Bild 13, links). Das Tragwerk ist an einem einbetonierten Eisenrahmen angeschraubt. Wenn für besonders grosse Modelle der Messquerschnitt ausnahmsweise 6 × 8 m betragen soll, kann die Vorsatzdüse losgeschraubt, an das fahrbare Zwischenstück angehängt und mit diesem weggefahren werden.

5. Das Zwischenstück

Der grosse Windkanal kann wahlweise mit offener oder geschlossener Messtrecke betrieben werden. Ein strahlseitig mit Holz beplanktes Tragwerk aus Profileisen bildet die geschlossene Messtrecke und ist auf dem fahrbaren Zwischenstück aufgebaut (Bild 11, Mitte). Die obere und die untere Begrenzungswand können zwecks Veränderung des statischen Druckes längs der Messtrecke verstellt werden. Da diese Verstellung nur sehr selten durchzuführen sein wird, wurde der Verstellungsmechanismus für Antrieb mit einer Handkurbel konstruiert. Zwei seitliche Treppen ermöglichen den Zugang zu den vier Galerien, von denen auf jeder Seite eine etwas unterhalb der Kanalaxe angeordnet ist, während sich die beiden oberen auf der Höhe der oberen Messtreckenwand befinden. Von den

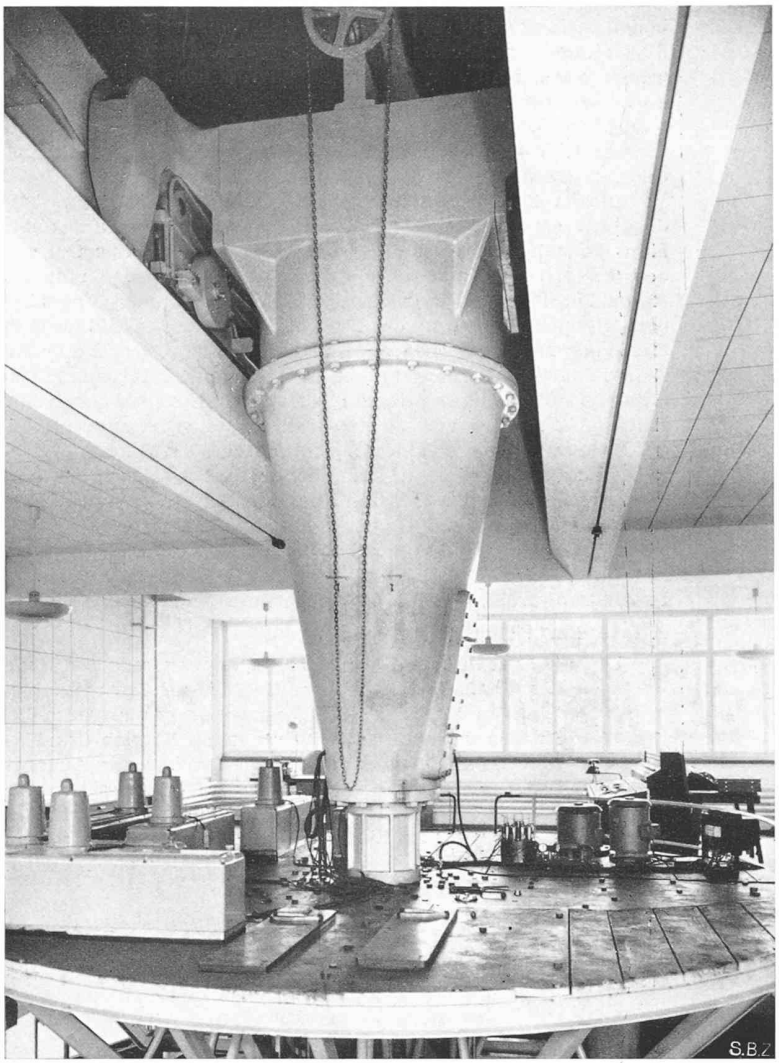

Bild 9. Verschiebbare Aufhängevorrichtung mit Messbühne und Waagen

oberen Galerien aus sind die Befestigungspunkte der Modellaufhängedrähte bequem zugänglich, während die unteren Galerien die Beobachtung des Modelles durch Fenster in der Messtreckenwand während des Betriebes ermöglichen. Von ihnen aus führen auf jeder Seite je eine Türe und je eine zurückklappbare Treppe in das Innere der Messtrecke.

Das Zwischenstück ist auf vier Rädern gelagert, von denen zwei von polumschaltbaren Motoren angetrieben werden. Zum genauen Einfahren in die Strahlmitte wird die Fahrgeschwindigkeit des Zwischenstückes automatisch durch Polumschaltung auf $^1/_3$ der normalen verringert (Bild 10).

6. Die Hebebühne

Diese Bühne dient dazu, die zu untersuchenden Modelle auf die Höhe der Kanalaxe zu bringen, wo sie an die Aufhängedrähte montiert werden. Die Plattform liegt in ihrer untersten Lage auf der Höhe des Bodens der grossen Messhalle und weist keinerlei hervorstehende Teile auf, so dass sie mit dem Modelltransportwagen ohne Hindernis befahren werden kann (Bild 13). Bei Betrieb mit der geschlossenen Messtrecke bildet sie einen Teil der unteren Strahlbegrenzungswand (Bild 11). Wenn durch Verstellen der oberen und unteren Strahlbegrenzungswand im Strahl verschiedene Druckgradienten eingestellt werden, so gestattet eine spezielle Vorrichtung, die Plattform der Hebebühne dem Neigungswinkel der unteren Strahlbegrenzungswand anzupassen. In der obersten Lage befindet sie sich rd. 1 m unterhalb der Kanalaxe, so dass die mit ihr auf diese Höhe gebrachten Modelle bequem aufgehängt werden können.

Bei der Wahl der Hubelemente war zu beachten, dass sich der höchste Grundwasserspiegel nur wenig unter der Bodenhöhe befindet, so dass zur Herabsetzung der Kosten für die Fundationen und deren Abdichtung die Tiefe der Grube zur Aufnahme der Hubvorrichtung möglichst gering zu halten war. Dieser Forderung konnte weitgehend dadurch entsprochen werden, dass als Hubelemente vier Teleskopspindeln gewählt wurden, die im eingefahrenen Zustand wenig Höhe benötigen. Da nun aber die Spindeln mit Spiel hergestellt werden müssen, so wurden noch zwei Führungssäulen, ebenfalls in Teleskopbauart angeordnet. Diese führen die Hebebühne beim Hochfahren genügend genau und verhindern ein Klemmen der Spindeln (Bild 12).

7. Der Auffänger

Diese Einrichtung soll den Luftstrahl «auffangen», dem Kanal und damit auch dem Gebläse wieder zuführen. Wird mit geschlossener Messtrecke gefahren, so bildet der Auffänger lediglich die Fortsetzung der Messtrecke. Beim Betrieb mit offener Messtrecke verbreitert sich die Uebergangszone zwischen Strahl und ruhender Umgebungsluft bekanntlich mit zunehmender Distanz von der Düse, so dass der Luftstrahl am Ende der Messtrecke einen wesentlich grösseren Querschnitt aufweist als kurz nach der Düse. Noch grösser ist der Strahlquerschnitt, wenn ohne Vorsatzdüse gefahren wird. Daraus ist ersichtlich, dass der Auffänger, wenn er allen Anforderungen gerecht werden soll, verstellbar gemacht werden muss.

Die Strahlform ist rechteckig mit abgeschrägten Ecken. Um die Konstruktion des Auffängers zu vereinfachen, wurden die oberen Abschrägungen mit der oberen und die unteren Abschrägungen mit der unteren Auffängerwand fest verbunden. Ebenso ist der Auffängerkragen entsprechend den Wänden unterteilt und mit diesen fest verbunden, so dass nur noch vier Teile verstellbar gemacht werden mussten. Dabei kommen die Seitenwände innen an die Abschrägungen zu liegen (Bild 11, rechts).

Um die für offenen und geschlossenen Betrieb günstigste Form des Kragens zu finden, hat man viele Versuche am Modellkanal durchgeführt. Die Auffängerwände 1 (Bild 4) mit den Kragen 2 bestehen aus einer kräftigen Konstruktion aus Profileisen mit strahlseitiger Holzbeplankung. Jede der vier Wände ist mit einem Verstellmechanismus 3 mit eigenem Antriebsmotor versehen.

8. Die Umlenkecken

In den Ecken, die den Luftstrom um 90° umlenken, sind Umlenkschaufeln eingebaut (Bild 8), deren günstigste Form durch verschiedene Modellversuche abgeklärt wurde. Die Umlenkschaufeln selbst sind in Beton hergestellt und abströmseitig mit Kanten aus Blech versehen.

9. Die Aufhängevorrichtung der Messbühne

Die kreisrunde Messbühne ist in der Mitte an einem mit der Spitze nach unten gerichteten, kegelförmigen Gusskörper aufgehängt, der seinerseits mit drei Pratzen auf zwei Schienen ruht (Bild 9). Die Schienen sind auf zwei parallel zur Strahlaxe gerichteten Betonträgern montiert. Die Pratzen sind mit auswechselbaren Unterlegplatten versehen, so dass

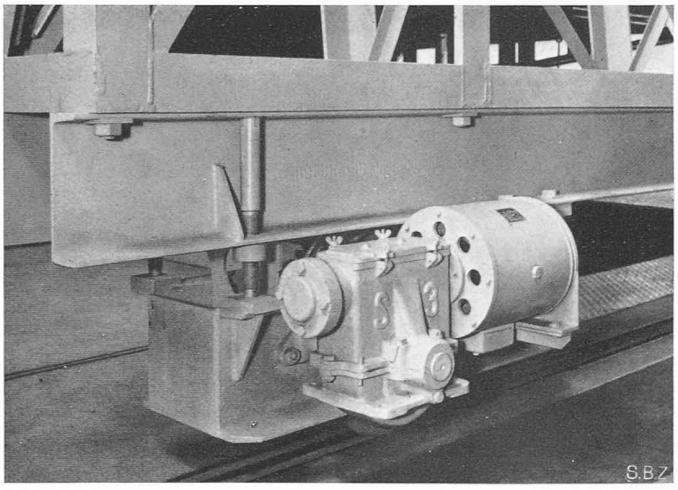

Bild 10. Antrieb des Zwischenstückes zum grossen Windkanal

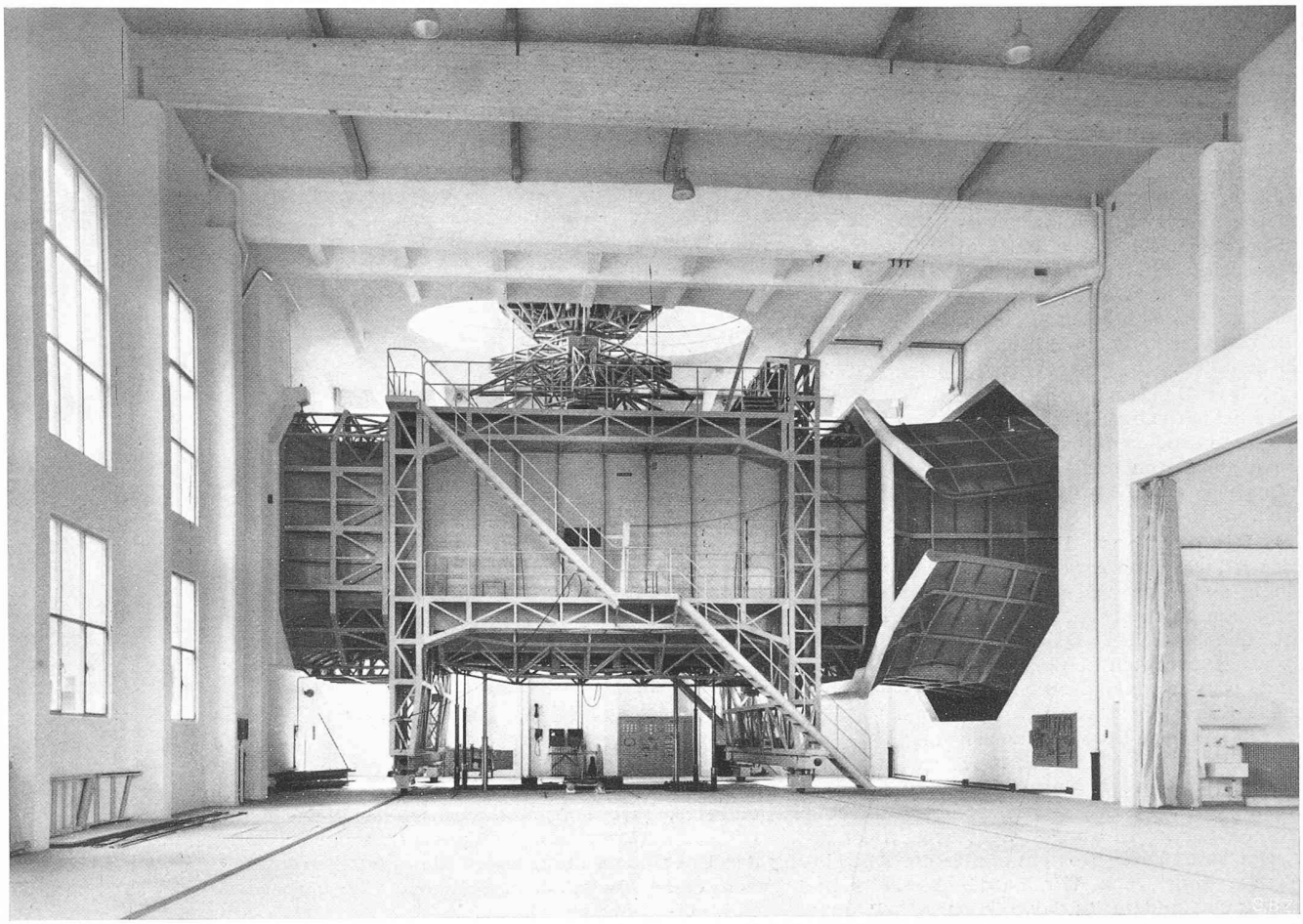

Bild 11. Grosse Messhalle. In der Mitte das ausfahrbare Zwischenstück, darunter die angehobene Hebebühne, darüber die «Spinne» für die Modellaufhängung, links die Düse, rechts der Auffänger. Die «Spinne» hängt an der Aufhängevorrichtung (Bild 9)

durch Verändern der Plattendicke die Drehaxe der Bühne genau vertikal gerichtet werden kann.

Um den mannigfachen Bedürfnissen zu entsprechen, wurde eine Vorrichtung geschaffen, die eine Verschiebung der Messbühne und damit auch des Modellaufhängepunktes längs der Strahlaxe von $\pm$ 2,25 m erlaubt. Mit Hilfe eines geeigneten Hebelsystems kann der Aufhängekonus mitsamt der Bühne gehoben werden, so dass sich die Pratzen von den Schienen abheben und das ganze Gewicht auf einem vierrädrigen Fahrwerk abgestützt wird. Ein Elektromotor mit umkehrbarer Drehrichtung treibt das Fahrwerk an, so dass innerhalb der genannten Grenzen beliebige Stellungen des Modell-Aufhängepunktes gewählt werden können. In jeder Endlage wird der Antriebsmotor automatisch von Endausschaltern abgestellt.

C. Kleiner Windkanal und Trudelkanal

Da die Trudeleinrichtung nur selten gebraucht wird, war es naheliegend, sie mit dem kleinen Windkanal zu kombinieren. Dies gelang, indem beim kleinen Windkanal die Umlenkecke vor der Düse vollständig aus Blech hergestellt und um 90° drehbar ausgebildet wurde, so dass die Luft für den Trudelbetrieb senkrecht nach oben durch die Trudeldüse geleitet werden kann (Bild 15). Die nachstehend beschriebene mechanische Ausrüstung des kleinen Windkanals wird somit weitgehend auch für den Trudelkanal benützt.

1. Die Formgebung stützte sich weitgehend auf die Versuche mit dem Modell-Windkanal. Mit Rücksicht auf die Kombination mit dem Trudelkanal ist der Querschnitt des druckseitigen kurzen Schenkels quadratisch ausgebildet. Zur

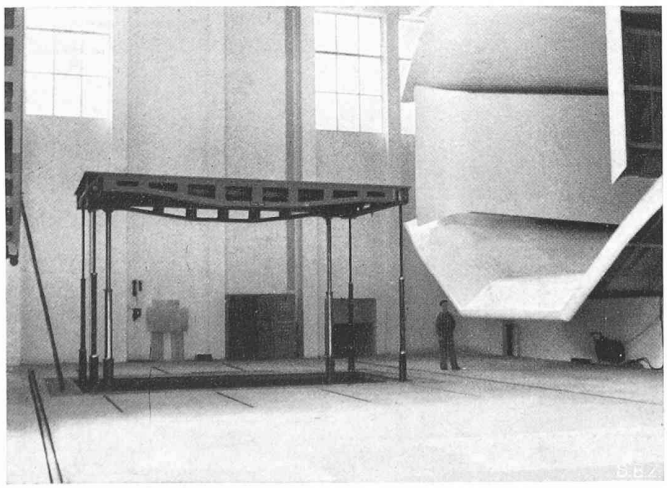

Bild 12. Hebebühne angehoben, rechts Auffänger, teilweise geöffnet

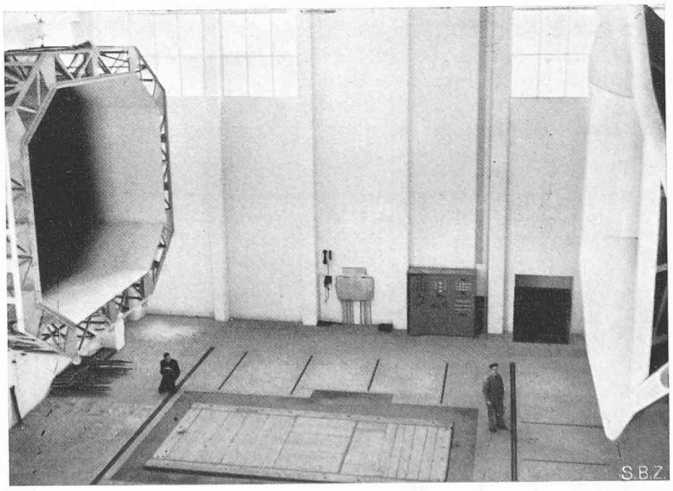

Bild 13. Die offene Messtrecke des grossen Windkanals. Links die Düse, rechts der Auffänger, unten die Hebebühne, bodeneben versenkt

Bestimmung der Form und der Abmessungen des Auffängers im Trudelturm wurden Einzelversuche an einem besonderen Holzmodell durchgeführt.

2. Das Gebläse ist ein einstufiges Axialgebläse mit vorgeschaltetem Leitapparat in normaler Bauart. Die Flügel können bei stillstehendem Laufrad einzeln verstellt werden. Die Welle läuft in fettgeschmierten Kugellagern. Der Durchmesser des Gebläses beträgt 3 m. Der Abströmkonus aus Holz wird von vier radialen Profilstreben gehalten.

3. Die Umlenkschaufeln in den beiden saugseitigen und in der ersten druckseitigen Ecke bestehen aus Beton und tragen abströmseitig eine feste Kante aus Blech.

4. Die drehbare Umlenkecke ist, wie oben erwähnt, vollständig aus Blech hergestellt und besitzt am Eintritt und am Austritt quadratischen Querschnitt mit abgeschrägten Ecken. Sie stützt sich im Kanalinnern auf einen Drehzapfen D_i (Bild 15) ab, der in profilierten Diagonalstreben gelagert ist. Ausserhalb des Kanals wird der äussere Drehzapfen D_a von einem Gerüst aus Profileisen getragen. Zur Drehung dient ein Acbar-Getriebemotor und eine Renoldkette, die auf einer kreisförmigen Schiene aufliegt.

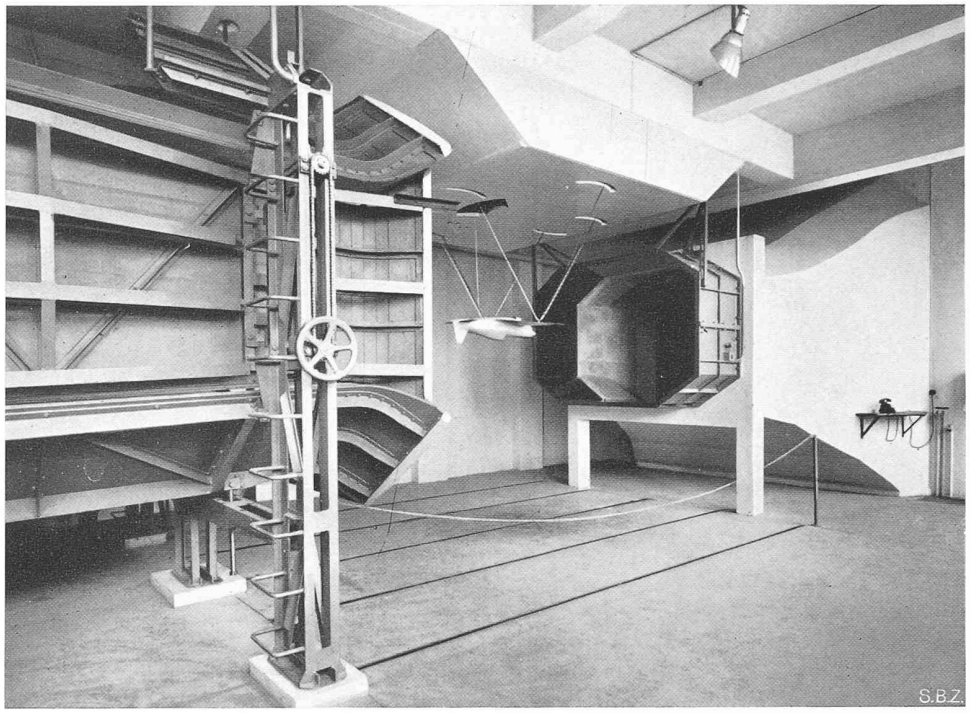

Bild 14. Messtrecke des kleinen Windkanals. Links Auffänger, rechts Düse

Ein besonderes Problem stellte die Abdichtung der Umlenkecke gegen den Windkanal einerseits und gegen den Trudelkanal anderseits dar, die nur ein Minimum von Manipulation vor und nach der Drehung verursachen sollte. Die Abdichtung gegen den Betonkanal in der Ebene senkrecht zur Drehaxe, also längs dem Spalt S (Bild 15), erfolgt durch ein Federblech, das von einem eingelegten Gummischlauch an die Umlenkecke gedrückt wird. Gegen die Düse des Windkanals dichten Klappen K, die vor dem Verdrehen geöffnet und nachher wieder geschlossen werden. Der Antriebsmotor, der die Umlenkecke dreht, ist elektrisch derart verriegelt, dass er nicht in Betrieb genommen werden kann, solange die Klappen nicht geöffnet sind.

5. Der Gleichrichter G (Bild 15) besteht aus ineinander gesteckten Blechen und weist ein Verhältnis von Maschenweite zu Maschentiefe von 1:6 auf. Er ist in die Umlenkecke eingebaut, so dass er deren Drehung mitmacht und auch bei Trudelbetrieb benützt wird.

6. Die Windkanaldüse (Bild 14, rechts) hat einen Querschnitt von 2,45 × 1,75 m mit abgeschrägten Ecken und besteht vollständig aus Beton mit einer Vorsatzdüse aus Guss. Diese weist im Gegensatz zum grossen Windkanal den gleichen Querschnitt auf, wie die Betondüse. Sie war vorgesehen, um einen möglicherweise etwas schiefen Strahl korrigieren zu können.

7. Der Auffänger aus einer Profileisenkonstruktion mit Holzbeplankung besitzt wie beim grossen Windkanal vier verstellbare Wände, wobei jedoch der Verstellmechanismus der einzelnen Wände von Hand betätigt werden muss. Obschon der kleine Windkanal nur mit offener Messtrecke und unveränderlicher Düsenöffnung betrieben werden kann, haben die verstellbaren Auffängerwände doch den Vorteil, den günstigsten Betriebsverhältnissen angepasst werden zu können.

8. Die Trudeldüse von 3 m Durchmesser besteht ganz aus Beton. Ihr Querschnitt beim Anschluss an die drehbare Umlenkecke ist naturgemäss quadratisch mit abgeschrägten Ecken und geht bis zum Austritt auf die runde Form über.

9. Der Auffänger im Trudelturm ist vollständig aus Holz hergestellt. Ein Deckel, ebenfalls aus Holz, ermöglicht den Abschluss des Trudelauffängers solange der Trudelkanal nicht in Betrieb ist.

10. Die Messbühne ist grundsätzlich auf die gleiche Art wie beim grossen Windkanal aufgehängt. Sie wird in der Mitte von einem konischen Gusskörper gehalten. Dieser kann in Axrichtung bei der Montage um ± 400 mm verschoben werden. Sollte aus irgend einem Grunde in einem späteren Zeitpunkt der Modell-Aufhängepunkt in Richtung der Strahl-

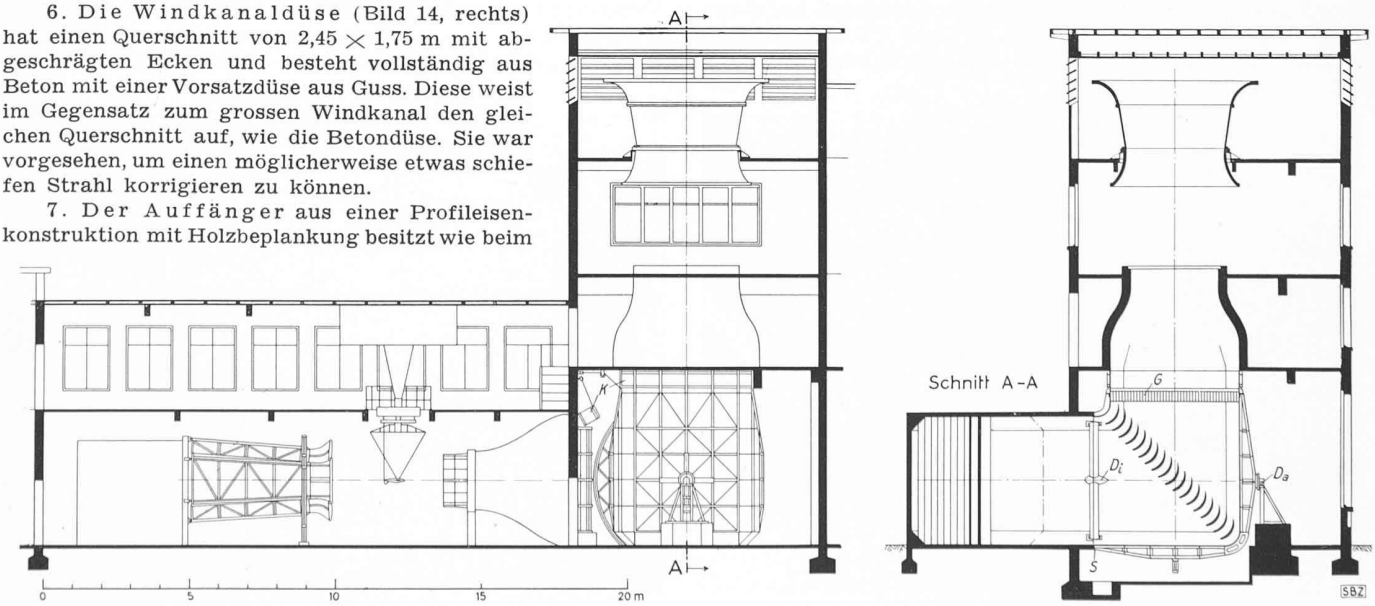

Bild 15. Schnitt durch die Messtrecke des kleinen Windkanals und durch den Trudelturm
D_i innerer Drehzapfen, D_a äusserer Drehzapfen, G Gleichrichter, K Dichtungsklappen, S Spalt in der Drehebene

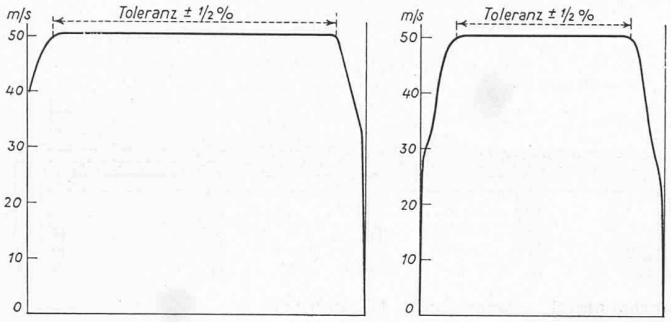

Bild 16. Geschwindigkeitsverteilung 1,5 m nach der Düse des kleinen Windkanals, links in der horizontalen Symmetrieaxe, rechts in der vertikalen Symmetrieaxe

axe verschoben werden müssen, so ist dies grundsätzlich möglich, erfordert jedoch jedesmal ein neues Ausrichten des Aufhängekonus.

D. Erreichte Strahleigenschaften

Bei der Inbetriebsetzung der Windkanäle zeigte sich der grosse Vorteil der verstellbaren Auffängerwände besonders deutlich, indem die anfänglich in starkem Masse auftretenden Pulsationen durch geeignete Einstellung der Wände zum Verschwinden gebracht werden konnten.

1. Beim kleinen Windkanal wird die verlangte Windgeschwindigkeit im offenen Strahl von 60 m/s erreicht. Die Geschwindigkeitsverteilung im Abstand von 1,5 m vom Düsenrand, also an der Stelle, an der das zu untersuchende Modell aufgehängt wird, ist aus Bild 16 ersichtlich. Bis nahe an den Strahlrand bleibt die Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit innerhalb der Toleranz von $\pm$ 1/2 %.

Längs der Strahlaxe verändert sich der statische Druck auf einer Länge von 57 % der Messtrecke nicht mehr als maximal $\pm$ 3 ‰ des Staudruckes. Die Turbulenz wurde mit einer polierten Holzkugel von 15 cm Durchmesser bestimmt. Die kritische Reynolds'sche Zahl erreichte den Wert von $3{,}1 \times 10^5$. Der Kanalfaktor bezogen auf die Leistung an der Gebläsekupplung wurde zu 2,22 gemessen.

2. Beim grossen Windkanal kann mit offener Messstrecke eine Windgeschwindigkeit von 69 m/s pulsationsfrei erzeugt werden, während bei geschlossener Messtrecke, wie verlangt, 80 m/s erreicht werden. Das zu untersuchende Modell wird im Abstand von rd. 4 m vom Düsenaustritt in den Strahl gehängt. Abgesehen von der Randzone beträgt die

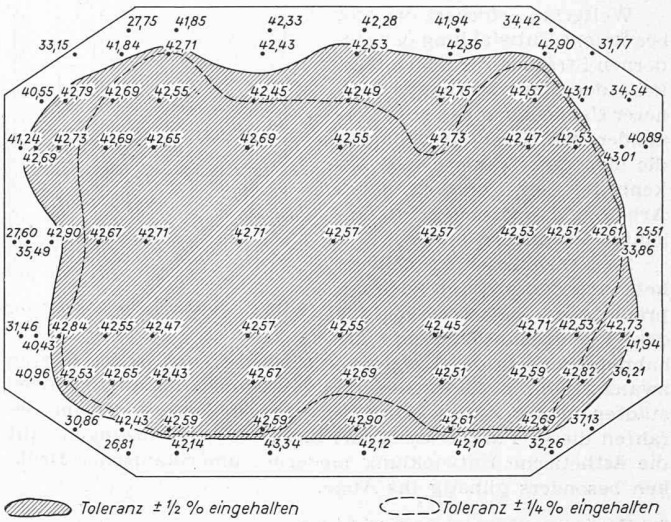

Bild 17. Geschwindigkeitsverteilung im grossen Windkanal bei offener Messtrecke 3 m hinter der Düse. Im schraffierten Feld wird die garantierte Toleranz von $\pm$ 0,5 % eingehalten, innerhalb der gestrichelten Linie betragen die Abweichungen nur $\pm$ 0,25 %

Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit ebenfalls im Maximum $\pm$ 1/2 % (vgl. Bild 17), innerhalb einer Fläche von rd. $4{,}5 \times 3$ m sogar nicht mehr als $\pm$ 1/4 %. Längs der Strahlaxe der offenen Messtrecke weicht der statische Druck auf einer Länge von 60 % der Messtrecke im Maximum $\pm$ 1 1/2 ‰ des Staudruckes vom Mittelwert ab. Die Strahlturbulenz wurde auch beim grossen Windkanal mit einer polierten Holzkugel von 15 cm Durchmesser bestimmt. Die kritischen Reynolds'schen Zahlen erreichen den Wert $3{,}56 \times 10^5$ beim offenen und $3{,}55 \times 10^5$ beim geschlossenen Strahl. Der Kanalfaktor beträgt bei der offenen Messtrecke 2,15 und bei der geschlossenen Messtrecke 3,75. Die Axe des offenen Strahls weicht um 0,3° von der theoretischen Kanalaxe ab. Da die Wände des Zwischenstückes verstellbar sind, kann der Strahl der geschlossenen Messtrecke genau in die Kanalaxe gerichtet werden.

3. Bei der Trudeldüse liegen infolge der geringen Kontraktion von 2,68 die Abweichungen von der mittleren Geschwindigkeit im Strahlkern zwischen den Grenzen $\pm$ 1 1/2 %. Als maximale Windgeschwindigkeit im Strahl wurden 29,5 m/s erreicht.

(Fortsetzung folgt)

Der heutige Stand des Brückenbaues in Amerika

Von Ing. Dr. h. c. O. H. AMMANN, Ehrenmitglied und Vertreter der G. E. P. in New York DK 624.21 (73)

Vortrag, gehalten vor der G. E. P. am 18. September 1947 in der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich. Hierzu Tafeln 25 bis 32

1. Einleitung

In dem durch den zweiten Weltkrieg in sich scharf abgeschlossenen Zeitabschnitt intensiver Bautätigkeit zeigt der amerikanische Brückenbau weitgehende Fortschritte. Frühere Bauten sind an Grösse weit überflügelt worden. Neue und bessere Brückenformen sind entstanden. Theorie und Entwurfspraxis sind erweitert und vervollkommnet worden; zum Teil als Ergebnis ausgedehnter experimenteller Untersuchungen, zu denen Behörden, Industrien, Universitäten und Berufsgesellschaften Hand in Hand beigetragen haben. Bessere Materialien, Fabrikations- und Baumethoden stehen dem Ingenieur zur Verfügung. Nicht zuletzt ist ein allgemeineres Verständnis für die ästhetische Behandlung von Brücken zu erkennen.

Die letztgenannte Entwicklung zeigt sich in vermehrtem Zusammenarbeiten zwischen Ingenieur und Architekt. Der Ingenieur ist geneigt, die bessere Schulung des Architekten in der Formgebung von Bauten zu würdigen, und anderseits anerkennt der Architekt die Notwendigkeit, solche Formgebung einer korrekten technischen Lösung zu unterstellen. Diese Entwicklung ist grossenteils dem Institut für Stahlkonstruktion zu verdanken, das jährlich einen Wettbewerb für die ästhetisch besten Lösungen in verschiedenen Brückenklassen eingeführt hat. Auch die Zementindustrie hat viel getan, um das Verständnis für gutes Aussehen von Betonbauten zu fördern.

In verschiedenen Richtungen ist Europa bahnbrechend vorangegangen. In gewissen Konstruktionsformen lässt sich eine deutliche Befolgung europäischer Ideen erkennen. Anderseits sind es hauptsächlich die Grösse und der Umfang neuer Bauten, und wohl auch die Entwicklung leistungsfähigerer Fabrikationseinrichtungen, Baumaschinen und Baumethoden, in denen Amerika vorangeschritten ist. Dies hat wohl seinen Grund in den geographischen und ökonomischen Verhältnissen des Landes mit seinen vielen breiten schiffbaren Gewässern und seinen reichen, noch unerschöpften Quellen von Rohmaterialien. Diese Fortschritte wurden nicht ohne ernste Fehler und kostspielige Misserfolge erreicht; aber es ist zu erwarten, dass die daraus gezogenen Erfahrungen zu wertvoller Erweiterung der technischen Kenntnisse beigetragen haben.

In der ins Auge gefassten Zeitspanne war es überwiegend die durch die enorme Entwicklung der Motorfahrzeuge bedingte Erweiterung des Strassennetzes, das viele Neubauten von Brücken verlangte. Während in frühern Perioden bedeutende Brücken haupsächlich dem Bedarf für Eisenbahnverkehr entsprangen, so verdanken die in den letzten zwanzig Jahren entstandenen grössten Brücken ihr Dasein vorwiegend der Entwicklung des Strassenverkehrs. Zudem hat sich der Charakter dieses Verkehrs so rasch verändert — grössere und schwerere Fahrzeuge, grössere Geschwindigkeiten und die daraus folgenden Forderungen nach grösseren Sicherheitsvorkehrungen —, dass viele Brücken schon nach zehn bis zwanzig Jahren nicht mehr genügten und erweitert oder durch neue ersetzt werden mussten.