Winddruck auf vollwandige Bauwerke und Gitterfachwerke

Autor(en): **Flachsbart, O.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen**

Band (Jahr): **1 (1932)**

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-713

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

WINDDRUCK AUF VOLLWANDIGE BAUWERKE UND GITTERFACHWERKE

ACTION DU VENT SUR LES CONSTRUCTIONS A PAROIS PLEINES ET EN TREILLIS

WIND PRESSURE ON SOLID-WALLED AND FRAMED STRUCTURES

Dr.-Ing. O. FLACHSBART,
Abteilungsleiter am Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung Göttingen und Privatdozent an der Technischen Hochschule Hannover.

I. Vorbemerkungen.

1. Einige grundlegende strömungsmechanische Tatsachen.

Trifft ein Windstrom von der örtlich und zeitlich gleichförmigen Geschwindigkeit v $[m \cdot s^{-1}]$ auf einen ruhenden Baukörper, dessen Projektionsfläche auf eine Ebene senkrecht zur Windrichtung F [m²] sein möge, so wird auf den Körper in Richtung des Windes eine Windkraft W ausgeübt, für die man mit einem dimensionslosen Proportionalitätsfaktor c_w die ganz allgemein gültige Beziehung anschreiben kann:

$$W = c_w \frac{\varrho v^2}{2} F [kg] \tag{1}$$

(ϱ = Luftdichte = rd. $^1/_8$ $kg \cdot s^2 : m^{-4}$ für normale Verhältnisse). An einer beliebigen Stelle i der Körperoberfläche wirkt dabei eine Normalkraft pro Flächeneinheit, ein Normaldruck p_i, der je nach der Lage der betrachtrachteten Stelle ein Unter- oder Überdruck sein kann und für den sich unter Benutzung eines dimensionslosen Beiwertes ζ_i analog schreiben läßt:

$$p_i = \zeta_i \frac{\varrho v^2}{2} [kg \cdot m^{-2}] \tag{2}$$

In ganz entsprechender Weise wäre ein Ausdruck für die Tangentialspannung anzusetzen. Ich lasse ihn fort, da die bei Winddruckfragen auftretenden Tangentialkräfte im allgemeinen klein sind gegenüber den Normalkräften.

Den Baupraktiker interessiert normalerweise die mögliche Maximalkraft

$$W_{max} = c_w \frac{\varrho v^2_{max}}{2} F \tag{3}$$

oder der örtliche Maximaldruck

$$p_{i_{max}} = \zeta_i \frac{\varrho v^2_{max}}{2} \tag{4}$$

Die in diesen Gleichungen vorkommenden dimensionslosen Beiwerte c_w und ζ_i sind, was zu beachten ist, nicht etwa von vornherein Konstante, sondern Funktionen der maßgebenden Zustandsgrößen: Körperform K, Körperabmessung (gekennzeichnet etwa durch eine charakteristische Länge l des Körpers), relative Oberflächenrauhigkeit $\frac{k}{l}$ (wo k als charakteristisches Längenmaß eines einzelnen Rauhigkeitshöckers angesehen werden kann), Windgeschwindigkeit v, Dichte ϱ und Zähigkeit μ der Luft (letztere beträgt bei 760 mm Hg und 15° C. rd. $1{,}8 \cdot 10^{-6}\ kg \cdot s \cdot m^{-2}$). Faßt man l, v, ϱ und μ zu der dimensionslosen Kennzahl $R = \frac{l v \mu}{\varrho}$, der sog. REYNOLDSschen Zahl, zusammen, so ist

$$c_w = c_w\left(K, l, \frac{k}{l}, v, \varrho, \mu\right) = c_w\left(K, \frac{k}{l}, R\right) \tag{5}$$

Für ζ_i gilt die gleiche Beziehung.

Die Ermittlung der Beiwerte c_w und ζ_i ist eine aerodynamische Aufgabe und zwar, da die Theorie dem Widerstandsproblem noch ziemlich machtlos gegenübersteht, eine Aufgabe der experimentellen Aerodynamik (Modellversuche in Windkanälen).

Sache der Aerologie ist es, die praktisch vorkommenden Windgeschwindigkeitsmaxima v_{max} durch Beobachtung festzustellen. Sie sind, wie nicht näher ausgeführt zu werden braucht, verschieden je nach geographischer Lage und Bodenbeschaffenheit des betr. Ortes.

Das „einfache Winddruckproblem", gekennzeichnet durch die Voraussetzung örtlich und zeitlich gleichförmiger Windgeschwindigkeit, ist hiermit angedeutet. Das „vollständige Winddruckproblem" ist erheblich verwickelter. Die Windgeschwindigkeit ist ja in Wirklichkeit weder örtlich noch zeitlich konstant. Sie nimmt zu mit wachsendem Abstand y vom Erdboden, sie schwankt außerdem zeitlich (Turbulenz, Böigkeit). Beide Erscheinungen stellen Aerologie und Aerodynamik vor neue Aufgaben. Man erkennt jedenfalls sofort, daß im allgemeinsten Fall c_w und ζ_i über die in Gl. (5) angedeuteten Abhängigkeiten hinaus auch von der Verteilung der Windgeschwindigkeit über dem Erdboden $[v(y)]$ und von der Böigkeit des Windes (ε) abhängig sind:

$$c_w = c_w\left[K, \frac{k}{l}, R, v(y), \varepsilon\right],^{1)} \tag{6}$$

ebenso ζ_i.

2. Die gegenwärtig gültigen Vorschriften für die Berechnung des Winddrucks auf Bauwerke.

Die heute gültigen behördlichen Vorschriften für die Berechnung des Winddrucks auf Bauwerke sind fast ausnahmslos Pauschalvorschriften der Art, daß dem Konstrukteur die Werte $\frac{W_{max}}{F}$ bezw. ζ_i vorgeschrieben werden. Das ist an sich in Ordnung, obgleich es mir richtiger zu sein scheint, den entwerfenden Ingenieur zur Benutzung des nicht ausgerechneten Produktes

[1]) Die genaue physikalische Bedeutung des Parameters ε braucht hier nicht zu interessieren.

$$c_w \frac{\varrho v^2_{max}}{2} \text{ bezw. } \zeta_i \frac{\varrho v^2_{max}}{2}$$

zu veranlassen und ihm die Wahl von c_w, ζ_i und v_{max} — innerhalb gewisser, festzusetzender Grenzen — selbst zu überlassen. Er hat dann klar vor Augen, um was es sich bei seiner Rechnung handelt.

Nicht in Ordnung ist dagegen die physikalische Grundlage der meisten Winddruckvorschriften. Sie fußen in der Regel auf der NEWTON'schen Widerstandstheorie, die zu folgenden Ergebnissen kommt:

a) Der Winddruck auf einen Körper ist bei gegebener Luftdichte und Windgeschwindigkeit unabhängig von der vollständigen Gestalt des Körpers, von seiner Rauhigkeit und von der REYNOLDS'schen Zahl, er ist allein abhängig von der Größe und Neigung der vom Winde getroffenen Vorderfläche des Körpers (die dem Winde abgewandte Fläche des Körpers trägt nach dieser Theorie nichts zum Widerstand bei).

b) Der Winddruck auf eine ebene, beliebig geneigte Fläche ist gleichmäßig über die Fläche verteilt.

c) Saugkräfte (Unterdrücke) treten nicht auf.

Da diese drei Sätze, wie ein Vergleich mit den Gl. (5) und (6) und den zahllosen Meßergebnissen der neueren Aerodynamik zeigt, falsch sind, sind auch die auf ihnen fußenden oder ihnen nachgebildeten Winddruckbestimmungen falsch [2]). Sie verkennen die wirklichen Tatsachen des hydrodynamischen Widerstandes und zwar so von Grund auf, daß es dringend notwendig ist, die Vorarbeiten zu leisten, die für eine einwandfreie Neufassung der Winddruckvorschriften erforderlich sind. Die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge sind dank den Arbeiten der neueren Strömungsforschung geklärt; ich habe sie in Abschnitt 1 kurz angedeutet. Zu lösen ist das eigentliche Winddruckproblem, von dem gezeigt wurde, in welcher Weise es sich in eine aerologische und aerodynamische Aufgabe teilt.

Die Dringlichkeit dieser Aufgaben hat man in den letzten Jahren in fast allen Kulturländern erkannt. Auch mit ihrer Bearbeitung wurde hier und dort in sehr beachtenswerter Weise begonnen. Eine systematische Inangriffnahme des ganzen Winddruckproblems ist mir aber von anderer Seite nicht bekannt geworden. Es darf daher als gerechtfertigt gelten, wenn ich im Folgenden in erster Linie über der Stand der systematischen Winddruckuntersuchungen berichte, mit denen im Göttinger Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung verbunden mit der Aerodynamischen Versuchsanstalt (weiterhin durch die Abkürzung AVA bezeichnet) vor einer Reihe von Jahren unter der Leitung des Verfassers begonnen worden ist [3]). Wichtige, von anderer Seite ausgeführte Untersuchungen, über die Veröffentlichungen vorliegen, werden soweit einbezogen werden, daß der Leser ein einigermaßen geschlossenes Bild von den Ergebnissen und den noch offenen Fragen der Winddruckforschung erhält [4]).

---

[2]) Daß die NEWTONSCHE Widerstandstheorie falsch ist, hat man zwar schon im 18. Jahrhundert gewußt, im 19. aber vielfach wieder vergessen. Vgl. hierzu O. FLACHSBART, Geschichte der experimentellen Hydro- und Aeromechanik, insbesondere der Widerstandsforschung. Handb. d. Experimentalphysik, Bd. IV, 2, Leipzig 1932.

[3]) Ein Teil der Versuche wurde mit Mitteln ausgeführt, die in dankenswerter Weise vom Preuß. Ministerium für Volkswohlfahrt, vom Verein Deutscher Ingenieure und von einigen anderen Behörden und Verbänden zur Verfügung gestellt waren.

[4]) Als Ergänzung mag dienen: BUSCH, Die Aufgaben des Bauingenieurs in der Winddruckfrage. „Bauingenieur" 5, p. 417 und 445 (1924). O. FLACHSBART, Wind-

Ich schicke voraus, daß ich auch von den Göttinger Untersuchungen eingehender nur die Untersuchungen über den Winddruck auf Gitterfachwerke behandeln werde, da sie von besonderem Interesse für den Brücken- und Stahlhochbau sind und bislang — mit einer Ausnahme — nicht veröffentlicht wurden. Bei den übrigen Untersuchungen begnüge ich mich mit kurzen Bemerkungen; ihre Ergebnisse sind entweder schon veröffentlicht (Winddruck auf vollwandige Bauwerke) oder aber noch zu unabgeschlossen (aerologische Versuche).

II. Versuchsergebnisse.

3. Aerologische Fragen.

Das Studium der Eigenschaften des natürlichen Windes — eine Aufgabe, die erhebliche Schwierigkeiten bereitet — geht zunächst den Aerologen und den Meteorologen von Fach an. Leider interessieren ihn die Fragen, die gerade für die Winddruckforschung wichtig sind, wenig. Zum mindesten haben sie ihn bislang wenig interessiert.

Um nicht auf ungewisse Zeit die aerologischen Daten entbehren zu müssen, die für die Lösung des Winddruckproblems absolut notwendig sind, habe ich in Gemeinschaft mit dem Leiter der AVA, Herrn Prof. Betz, entsprechende Untersuchungen in Angriff genommen. Unsere Absicht ist in erster Linie, die aerologische Kardinalfrage zu beantworten: welche Höchstwerte erreicht die Windgeschwindigkeit? Was bis heute darüber vorliegt, sind ganz wenige auch nur einigermaßen zuverlässige Meßergebnisse, dagegen zahlreiche mangelhafte Beobachtungen und stark auseinandergehende Meinungen. In zweiter Linie soll die Böendauer, die räumliche Ausdehnung der Böen und die Verteilung der Windgeschwindigkeit über dem Erdboden studiert werden. Zur Verwirklichung dieser Absichten haben wir im Jahre 1931 vorerst einen trägheitsschwachen Böenmesser gebaut, dessen Konstruktion von Herrn Betz stammt. Die Erprobung der Erstausführung erstreckte sich über mehrere Monate des vergangenen Jahres und lieferte außer Fingerzeigen für eine Verbesserung des Instruments einige interessante Ergebnisse über das Verhältnis der Geschwindigkeitsmaxima zur mittleren Geschwindigkeit. In den windschwachen Monaten Mai bis Juli 1931 wurde mit diesem Gerät auf der Plattform des Göttinger Geophysikalischen Instituts gemessen:

eine	Windgeschwindigkeit	von	rund	20	m/s	an 6	Tagen
„	„	„	„	22	„	„ 2	„
„	„	„	„	30	„	„ 1	Tag.

Die gleichzeitig und am gleichen Ort durch ein Schalenkreuzanemometer angezeigten mittleren Windgeschwindigkeiten betrugen ausnahmslos etwas weniger als die Hälfte dieser Werte. Die Geschwindigkeitsmaxima der Böen können also durchaus und offenbar nicht selten mehr als das Doppelte der mittleren Windgeschwindigkeit betragen. Für die Messung der Böendauer war das Instrument nicht eingerichtet. Eine entsprechende Ergänzung der Konstruktion ist beabsichtigt.

Wir hoffen, die endgültige Durchbildung des Betz'schen Böenmessers in diesem Jahre zu beenden und dann derartige Instrumente für eine mehr-

druck auf Bauwerke. „Naturwissenschaften" 18, p. 475 (1930). O. Flachsbart, Der gegenwärtige Stand der Winddruckforschung. Jahrbuch 1930 d. Deutschen Gesellschaft f. Bauingenieurwesen, p. 108 (Berlin 1931).

jährige Beobachtungsdauer an verschiedenen Orten aufstellen zu können. Man darf erwarten, daß so in einigen Jahren das aerologische Material beschafft werden kann, das der Winddruckforschung heute fehlt.

Inzwischen muß man sich an das Wenige halten, was über Böen und Windverteilung bekannt ist. Man vgl. hierzu etwa BUSCH und FLACHSBART [5]).

4. Das aerodynamische Problem. Allgemeines.

Ein Blick auf die Gl. (6) zeigt, daß das vollständige aerodynamische Winddruckproblem kaum weniger kompliziert ist als das aerologische. Zum Glück vereinfacht sich die Aufgabe in der Mehrzahl der praktischen Fälle und zwar aus folgenden Gründen:

a) Die Baukörper lassen sich einteilen in solche, an denen der Wind scharfe Kanten quer überströmen muß (fast alle Wohn- und Industriegebäude, ebenso Gitterfachwerke) und solche, die keine quer überströmte scharfe Kante haben (Schornsteine, kreiszylindrische Behälter für Gase und Flüssigkeiten u. ä., im Folgenden als Körper mit gewölbten Oberflächen bezeichnet). Bei den ersteren wird der Strömung durch die scharfen Kanten ein für alle Mal die Stelle aufgezwungen, an der sie sich vom Körper ablöst, um leeseits ein unregelmäßig durchwirbeltes Unterdruckgebiet (Totwasser) zu bilden. Bleibt die Lage der Ablösungsstelle erhalten, so bleibt auch die Ausdehnung des Totwassergebiets, das ja das anschauliche Korrelat des Widerstandes ist, unabhängig von Geschwindigkeit und Rauhigkeit erhalten. Die Drücke ändern sich proportional v^2, also sind c_w und ζ_i in diesem, aber auch nur in diesem Fall unabhängig von der REYNOLDS'schen Zahl und der Oberflächenrauhigkeit des Gebäudes (jedenfalls mit genügender Annäherung). Demgegenüber hängt bei Körpern mit gewölbter Oberfläche die Lage der Ablösungsstelle und infolgedessen die Ausdehnung des Totwassergebiets sehr von den besonderen hydrodynamischen Bedingungen ab, beide sind Funktionen von R und $\frac{k}{l}$. Man muß sich also merken: Für Körper mit scharfen quer überströmten Kanten, mit denen man es in der Bautechnik ja überwiegend zu tun hat, sind c_w und ζ_i praktisch unabhängig von R und $\frac{k}{l}$; Körper mit gewölbten Oberflächen zeigen dagegen eine deutliche Abhängigkeit der Widerstands- und Druckbeiwerte von R und $\frac{k}{l}$.

b) Es ist erwiesen, daß die Widerstands- und Druckbeiwerte bei scharfkantigen Körpern unabhängig von der Turbulenz (Böigkeit) des Luftstroms sind, wenn der Luftstrom im Mittel stationär ist. Für gewölbte Körper gilt das nicht. Unter der Voraussetzung einer im Mittel stationären Strömung darf man daher für scharfkantige Körper — mit gewissen Vorbehalten — auch den Parameter Böigkeit streichen. Wie einzelne starke Böen wirken, muß und kann an dieser Stelle dahingestellt bleiben, denn die Frage läuft praktisch auf die andere hinaus, welches v_{max} der Winddruckberechnung zugrunde zu legen ist.

---

[5]) l. c. Fußn. 4.

Infolgedessen besteht das aerodynamische Problem in der (experimentellen) Ermittlung der Beiwerte

$$c_w = c_w\,[K, v(y)] \qquad \zeta_i = \zeta_i\,[K, v(y)] \tag{7}$$

für scharfkantige Bauwerke,

$$c_w = c_w\left[K, \frac{k}{l}, R, v(y), \varepsilon\right] \qquad \zeta_i = \zeta_i\left[K, \frac{k}{l}, R, v(y), \varepsilon\right] \tag{8}$$

für Bauwerke mit gewölbten Oberflächen.

Für scharfkantige Bauwerke vereinfacht sich das Problem also erheblich.

5. Winddruck auf vollwandige scharfkantige Bauwerke.

Sieht man in erster Näherung von $v(y)$ ab, nimmt man also im Sinne des einfachen Winddruckproblems an, daß v unabhängig von der Höhe über dem Erdboden ist — was praktisch bedeutet, daß die verzögert strömende Reibungsschicht am Boden verschwindend dünn sein soll —, so gilt für einen vorgegebenen scharfkantigen Baukörper K, etwa ein normales Wohnhaus oder eine Fabrikhalle,

$$c_w = \text{const.} \qquad \zeta_i = \text{const.} \qquad W \text{ prop. } v^2$$

m. a. W.: Widerstandsbeiwert und Druckverteilung sind für einen scharfkantigen Baukörper unabhängig von Modellmaßstab und Windgeschwindigkeit.

Auf Grund dieser Tatsache ist in den Windkanälen der aerodynamischen Laboratorien eine große Zahl von Versuchen an verkleinerten Modellen scharfkantiger vollwandiger Bauwerke ausgeführt worden; die Modelle standen dabei auf glatten ebenen Bodenplatten. In Göttingen wurden so die Druckverteilungen für mehrere Serien von Modellen offener und geschlossener Gebäudetypen untersucht. In besonderen Versuchsreihen ist darüber hinaus der Einfluß von $v(y)$ auf die Druckverteilung studiert worden. Ich verweise kurzerhand auf die erschienenen Veröffentlichungen [6]), die zusammen mit den Ergebnissen einiger an anderen Orten vorgenommener, unten gleichfalls zitierter Untersuchungen [7]) meist ausreichende Auskunft erteilen werden (in ungewöhnlichen Fällen sollte man stets besondere Modellversuche vornehmen). Nur die folgenden Bemerkungen mögen hier Platz finden:

Die Abhängigkeit des Widerstandes und der Druckverteilung von der Körperform ist so ausgeprägt, daß es vorläufig unmöglich ist, die Ergebnisse in einigen wenigen Formeln zusammenzufassen. Wer im gegebenen Fall Aus-

---

[6]) O. Flachsbart, Modellversuche über den Winddruck auf geschlossene und offene Gebäude. In: 4. Lieferung der Ergebnisse der AVA zu Göttingen (München und Berlin 1932). — Vgl. ferner die den gleichen Gegenstand behandelnden Auszüge aus Versuchsberichten d. Verfs. in den Jahrbüchern der Deutschen Ges. f. Bauingenieurwesen: Jahrbuch 1927, p. 88—90 einschl. Tafeln I bis V. Jahrb. 1928, p. 160—169 einschl. Tafel V u. VI (mit Teilen aus einem Strömungsfilm d. Verfs.).

[7]) Bounkin u. Tcheremoukhin, Wind pressures on roofs and walls of buildings. Transactions of the Central Aero-Hydrodynamical Institute No. 35. Moskau 1928. (Russischer Text mit englischer Zusammenfassung). Irminger und Noekkentved, Windpressure on buildings. Kopenhagen 1930. Chr. Noekkentved, Winddruck an Gebäuden. Verhandlungen der 3. internat. Kongress. f. techn. Mechanik, Stockholm 1930, p. 184. Untersuchungen über die Winddruckverteilung an Hochhausmodellen führten aus: Dryden und Hill, Wind pressures on structures. Scientific Papers of the Bureau of Standards Nr. 523, Washington 1926.

künfte braucht, muß sich die gemessenen Druckverteilungen ansehen. Überdruck herrscht stets nur auf Teilen der Oberfläche, die dem Winde zugekehrt sind. Saugkräfte überwiegen im ganzen. Der größte Überdruck ist $\frac{\varrho v^2}{2}$. Als größter Unterdruck wurde $-1{,}7\frac{\varrho v^2}{2}$ gemessen und zwar auf dem Flachdach eines Gebäudemodells mit rechteckigem Grundriß bei Anblasung gegen eine Vertikalkante des Hauses; der betr. Punkt liegt in dem Feld des Daches, das sich unmittelbar an die windseitige Schmalwand des Gebäudes anschließt (für Satteldächer ergaben sich nur unwesentlich kleinere Werte).

Man beachte, daß sich die Druckverteilungen merklich ändern, wenn sich andere Gebäude in der Nähe befinden, wenn das Innere des Hauses mit der umgebenden Luft in Verbindung steht, wenn das Gelände größere Unebenheiten aufweist u. s. f. Gruppen von zwei und fünf Gebäuden sind in Göttingen untersucht worden. Man findet Teile der Ergebnisse l. c. im Jahrbuch 1928 der Deutschen Gesellschaft für Bauwesen. Den Einfluß der Wanddurchlässigkeit haben Bounkin und Tcheremoukhin und Noekkentved studiert [7]).

6. Winddruck auf vollwandige Baukörper mit gewölbten Oberflächen.

Große und nur zum Teil behobene Schwierigkeiten bereitet die Frage des Winddrucks auf vollwandige gewölbte Baukörper. Worin die Schwierigkeiten bestehen, zeigt ein Blick auf Gl. (8): die Zahl der Parameter ist zu groß. Ihr Einfluß läßt sich bei dem gegenwärtigen Stand der Forschung nur zum Teil überblicken, der Modellversuch ist daher unsicher.

Die Abhängigkeit von der Reynolds'schen Zahl würde für sich genommen bedeuten, daß — anders als bei scharfkantigen Körpern — das Ergebnis der Modellmessung nur dann auf die Großausführung übertragen werden kann, wenn die Reynolds'sche Zahl in beiden Fällen dieselbe ist, bezw. wenn bei gleicher Beschaffenheit der Luft das Produkt $v \cdot l$ im Windkanal und in der Natur das gleiche ist. Schon diese Ähnlichkeitsbedingung ist in der Mehrzahl der heutigen Windkanäle nicht zu erfüllen, da ihre Leistungen nicht ausreichen [8]). Immerhin handelt es sich um keine prinzipielle Schwierigkeit. Unangenehmer ist, daß Rauhigkeit und Turbulenz in die Gl. (8) eingehen. Man weiß von beiden, daß sie bei gewölbten Körpern eine nicht unerhebliche Rolle spielen. Allgemeine quantitative Aussagen zu machen und damit dem Modellversuch die gesicherte Basis zu geben, ist aber vorerst unmöglich.

Man muß sich infolgedessen wohl oder übel entschließen, Messungen an ausgeführten Bauwerken vorzunehmen. Die ersten Schritte in dieser Richtung haben Döring [9]) und Dryden und Hill [10]) getan und zwar mit Messungen an Schornsteinen. Eine Auswertung der Messungen von Dryden und

---

[8]) Die größte in Windkanälen gemessene Reynoldssche Zahl für Kreiszylinder ist $R = \frac{v D \mu}{\varrho} = 7{,}2 \cdot 10^5$ (D = Zylinderdurchmesser). Die Reynoldssche Zahl normaler Industrieschornsteine ist von der Größenordnung 10^6. Für Gasometer beträgt sie größenordnungsmäßig 10^7.

[9]) K. Döring, Wind und Wärme bei der Berechnung hoher Schornsteine aus Eisenbeton. Berlin 1925.

[10]) Dryden und Hill, Wind pressure on circular cylinders and chimneys. Bureau of Standards Journal of Research, p. 653, Report 221 (1930).

HILL [11]) führt für Schornsteine aus Ziegelmauerwerk auf den Widerstandsbeiwert

$$c_w = 0{,}65 \text{ bis } 0{,}70,$$

der sich zufällig in Übereinstimmung befindet mit den auf der NEWTON'schen Widerstandstheorie fußenden Angaben der preußischen Vorschriften für die Winddruckberechnung von Schornsteinen. Für Schornsteine mit sehr glatter Außenfläche wird man diesen Wert wahrscheinlich auf 0,50 erniedrigen dürfen.

Einzelne Fragen kann man selbstverständlich auch heute schon an Hand von Modellversuchen klären. So haben Versuche des Verfassers an Gasometermodellen das interessante Resultat ergeben [12]), daß die größten Unterdrücke, die ja die Festigkeitsberechnung entscheidend beeinflussen und für die bei vollkommen glatter Außenhaut rd. $-2{,}0\,\frac{\varrho v^2}{2}$ gemessen wurde, auf die Hälfte, d.h. auf rd. $-1{,}0\,\frac{\varrho v^2}{2}$ sanken, wenn die Außenfläche auf 24 Mantellinien mit Versteifungsrippen besetzt, also rauh gemacht wurde. Dieser Tatbestand wird sich — zum mindesten grundsätzlich — auch bei größeren REYNOLDS'schen Zahlen nicht ändern.

Im übrigen aber muß dem Praktiker geraten werden, bei der Benutzung von c_w- und ζ_i-Werten, die bei anderen REYNOLDS'schen Zahlen gemessen wurden, als sie der Großausführung entsprechen, äußerste Vorsicht walten zu lassen. Das umsomehr, als das ganze Problem durch den Einfluß der Rauhigkeit und der Turbulenz erheblich erschwert wird. Ich verzichte hier auf ein weiteres Eingehen und verweise auf meinen demnächst in einer deutschen Bauingenieurzeitschrift erscheinenden Bericht über diese Fragen.

7. Winddruck auf Gitterfachwerke.

Die in der Bautechnik vorkommenden Gitterfachwerke sind fast ausschließlich scharfkantig, für sie gilt also die einfache Beziehung der Gl. (7)

$$c_w = c_w\,[K, v\,(y)]$$

oder, wenn wir zunächst wieder die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe vernachlässigen,

$$c_w = c_w(K) \tag{9}$$

einschließlich der daraus in Abschnitt 5 bereits gezogenen Konsequenz: Für einen bestimmten Körper, hier ein bestimmtes Fachwerk K, ist c_w unabhängig von Modellmaßstab und Windgeschwindigkeit. (Das Gleiche gilt für die Verteilung der Druckbeiwerte ζ_i, die bei Fachwerken wenig oder gar nicht interessiert.) Der Modellversuch wird damit wie bei scharfkantigen vollwandigen Bauwerken zum geeigneten Auskunftsmittel.

Bezüglich des Gestaltparameters K überlegt man sich leicht Folgendes: Ein Gitterfachwerk hat die Eigenschaft, daß seine Gestalt im Gegensatz zum vollwandigen Körper nicht eindeutig durch die Umrißfläche (U) bestimmt ist. Gibt man die Umrißfläche vor, etwa die Rechteckfläche eines Parallel-

---

[11]) O. FLACHSBART, Winddruck auf Schornsteine. „Naturwissenschaften" **19**, p. 759 (1931).

[12]) O. FLACHSBART, Winddruck auf Gasbehälter. In: 4. Liefg. d. Ergebnisse d. AVA zu Göttingen (München und Berlin 1932).

trägers, so kann offenbar innerhalb dieser Umrißfläche der Fachwerktyp (T) noch sehr verschieden ausgebildet werden: als Diagonal-, als Kreuz-, als N- oder als beliebiger anderer Verband. Gibt man U und T vor, so ist es immer noch möglich, die Feldweite verschieden zu wählen. Die Gestalt K eines Gitterfachwerks kann daher — von den Stabprofilen abgesehen — durch drei Parameter ausgedrückt werden: U, T und φ, wobei φ ein Maß für den Anteil der Stab- und Knotenflächen an der gesamten Umrißfläche ist. Wir schreiben daher der Klarheit wegen lieber

$$c_w = c_w(U, T, \varphi), \tag{10}$$

was inhaltlich mit Gl. (9) identisch ist, da die Parameter U, T und φ in dem früher benutzten Parameter K summarisch zusammengefaßt sind, und setzen

$$\varphi = \frac{F_r}{F} \tag{11}$$

F_r ist darin die Projektionsfläche des Fachwerks, d. i. die Summe der Projektionsflächen aller einzelnen Stäbe und Knotenpunkte; F ist die Projektionsfläche des äußeren Fachwerkumrisses. (Beispiel: Für einen Kreisring zwischen den Radien r_a und r_i ist $F_r = \pi\,(r_a^2 - r_i^2)$ und $F = \pi r_a^2$.) φ möge als Völligkeitsgrad bezeichnet werden. Er ist ein Maß für die Dichte des Gitters. Ein Gitterfachwerk mit kleinem φ ist sehr durchlässig, $\varphi = 1$ kennzeichnet eine vollwandige Fläche.

Aus Gründen der Ökonomie ist es wichtig, die experimentelle Untersuchung einer so vielgestaltigen Klasse von Bauwerken, wie sie bei Gitterfachwerken vorliegt, von vornherein gewissen Leitgedanken zu unterwerfen. Folgender Weg erscheint gangbar. Erster Schritt: Da fast alle räumlichen Gitterfachwerke der Praxis aus ebenen Fachwerken zusammengesetzt sind, wird man versuchen, den Winddruck eines räumlichen Fachwerks zurückzuführen auf den Winddruck eines einzelnen ebenen Fachwerks. Zweiter Schritt: Reduktion des Winddrucks einzelner ebener Fachwerke auf den Widerstand einzelner Stäbe und Knotenpunkte.

Der Widerstand isolierter Stäbe ist bekannt. Unbekannt ist der Widerstand eines einzelnen Stabes im Verbande eines Fachwerks. Es erscheint an sich durchaus lohnend und vor allem methodisch konsequent, diese Größe für alle praktisch wesentlichen Stabformen und Einbauarten experimentell zu ermitteln und dann den Gesamtwiderstand eines Fachwerks aus den Einzelwiderständen der Stäbe rechnerisch aufzubauen. Ob dieses Verfahren (die Reduktion auf den einzelnen Stab) aber wirklich notwendig ist, ob es vor allem auf dem kürzesten Weg zur Lösung führt, mußte von vornherein mehr als zweifelhaft erscheinen. Aus diesem Grunde haben wir, gestützt auf gewisse Erfahrungen und Überlegungen, den zweiten Schritt nicht getan und uns auf den ersten, den Versuch der Reduktion auf einzelne ebene Fachwerke, beschränkt. Die Ergebnisse der Versuche rechtfertigen, wie ich glaube, dieses Vorgehen.

Den Ausgangspunkt der in Göttingen durchgeführten systematischen Untersuchungen bilden, was hiernach nicht weiter begründet werden muß, Versuche an ebenen Fachwerken mit gleichem Umriß, aber verschiedenem Fachwerktyp und verschiedenem Völligkeitsgrad.

a) Einzelne ebene Gitterfachwerke mit unendlichem Seitenverhältnis. Da es sich zunächst um prinzipielle Versuche handelte, wurden parallelgurtige Träger mit verschiedensten Fachwerktypen — unbekümmert um ihr Vorkommen oder Nicht-Vorkommen in der Praxis —

zwischen zwei in Windrichtung gestellten parallelen ebenen Seitenwänden untersucht. Fig. 5 zeigt eine derartige Versuchsanordnung, allerdings für ein räumliches Gitter. Die Seitenscheiben schaffen, indem sie die Umströmung der freien Trägerenden verhindern, sehr angenähert den Zustand, wie er bei einem unendlich langen Träger und ziemlich angenähert auch noch bei einem sehr langen Träger überall gleichen Fachwerks im gleichförmigen Windstrom vorliegen würde. Bezeichnet man die Höhe des Trägers mit h, seine Spann-

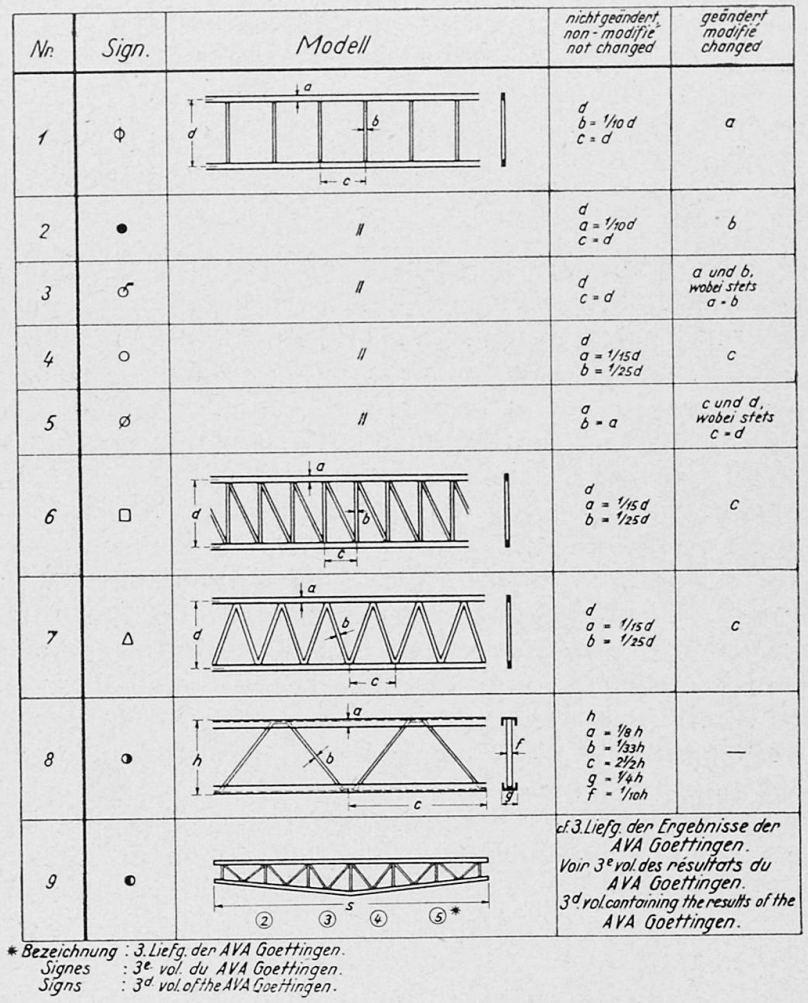

Fig. 1

Die in Göttingen untersuchten Modelle ebener Fachwerkträger.
Modèles de poutres en treillis planes étudiées à Göttingen.
Models of plane frameworks tested in Goettingen.

weite mit s, so kann man sagen: die untersuchten Träger hatten „unendliches Seitenverhältnis" ($s/h = \infty$). Derselbe Sachverhalt soll durch den im Folgenden zuweilen benutzten Terminus „zweidimensionale Strömung" ausgedrückt werden.

Die Messungen wurden über den ganzen Bereich $\varphi = 0 \rightarrow 1$ erstreckt, jedoch auf die Anblasung normal zur Gitterebene beschränkt. Aus dieser Beschränkung ließ sich für die Versuche ein nicht unwesentlicher Vorteil ziehen: Frühere Göttinger Untersuchungen an Profilträgern haben

[13]) Messungen von Profilträgern. In: 3. Liefg. der Ergebnisse d. AVA zu Göttingen (München und Berlin 1927).

nämlich gezeigt[13]), daß die gebräuchlichen Profile bei Anblasung quer zur Flansch- oder Stegfläche alle nahezu denselben Widerstandsbeiwert haben: in zweidimensionaler Strömung, d. h. für unendlich lange Träger $c_{w\infty}$ = rd. 2,0 (der Index ∞ soll andeuten, daß es sich um den Widerstandsbeiwert für unendliches Seitenverhältnis handelt). Den gleichen Widerstandsbeiwert hat aber unter gleichen Bedingungen auch eine quer angeströmte ebene Platte oder ein nicht zu dicker prismatischer Stab bei Anblasung normal zur größeren Seitenfläche. Auf die Profilierung der Stäbe konnte daher verzichtet werden. Alle Stäbe wurden als prismatische Träger mit rechteckigem Querschnitt, größere Seite quer zum Winde, ausgebildet.

Nr. 1 bis 8 der Fig. 1 zeigt die Modelle, Fig. 2 die Meßergebnisse. Die beiden in Fig. 2 benutzten Widerstandsbeiwerte $c_{w\infty}$ und $c_{w_{r\infty}}$ unterscheiden sich dadurch, daß c_{w_∞} auf die Projektionsfläche F, $c_{w_{r\infty}}$ auf die Projektionsfläche F_r bezogen ist:

$$c_{w_\infty} = \frac{W_\infty}{\frac{\varrho v^2}{2} F} \qquad c_{w_{r\infty}} = \frac{W_\infty}{\frac{\varrho v^2}{2} F_r}, \tag{12}$$

Das Resultat der Fig. 2 ist überraschend und erfreulich genug. Es zeigt, daß der Widerstand eines ebenen Fachwerks mit unendlichem Seitenverhältnis bei gegebenem Umriß und Völligkeitsgrad nahezu unabhängig vom Fachwerktyp ist. Für unendliche Spannweite gilt daher für einen Fachwerkträger von vorgegebener Umrißform U

$$c_{w_\infty} \cong c_{w_\infty}(\varphi) \qquad c_{w_{r\infty}} \cong c_{w_{r\infty}}(\varphi), \tag{13}$$

sein Widerstandsbeiwert ist mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit also allein eine Funktion von φ.

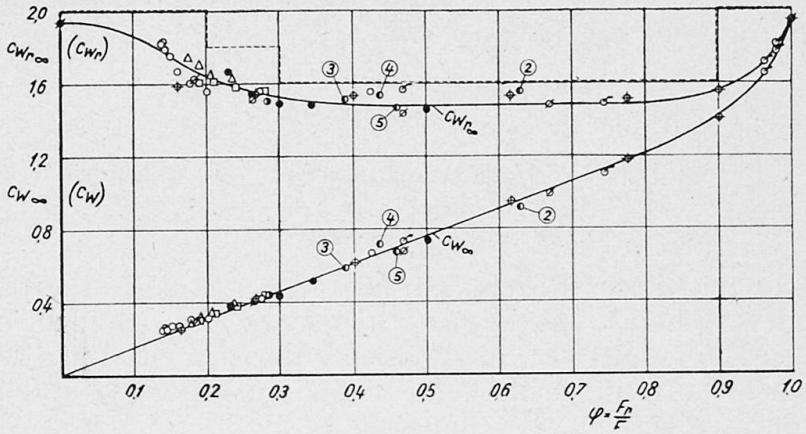

Fig. 2.

Widerstand ebener Gitterfachwerke. Ergebnisse der mit den Modellen der Fig. 1 ausgeführten Versuche. Mit Ausnahme der Brückenträger-Modelle Nr. 9 (Fig. 1) wurden alle Modelle zwischen ebenen Scheiben, also in zweidimensionaler Strömung untersucht. Vgl. auch das Lichtbild Fig. 5.

Résistance d'ouvrages en treillis plans. Résultats des essais effectués avec les modèles de la fig. 1. Tous les modèles ont été essayés entre deux parois planes, c-à-d. dans un courant à deux dimensions, à l'exception des longerons modéle n° 9 (Fig. 1). Voir aussi la photographie fig. 5.

Resistance of plane frameworks. Test results obtained from the models shown in fig. 1. With the exception of the bridge-girder models No. 9 (fig. 1.) all models have ben investigated between two parallel plane discs, i. e. in a two-dimensional flow. For comparison, see also the photograph, fig. 5.

Beschränkt man sich auf die Diskussion von c_{w_r}, das die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gittern deutlicher hervortreten läßt als c_w, so zeigt Fig. 2 weiter, daß in einem weiten Bereich des Völligkeitsgrades und zwar für $0{,}3 < \varphi < 0{,}85$ der Beiwert $c_{w_{r\infty}}$ auch noch unabhängig von φ ist:

$$c_{w_r} \cong \text{const} \quad (\text{für } 0{,}3 < \varphi < 0{,}85). \tag{14}$$

Mit Rücksicht auf den durch Gl. (13) ausgedrückten Tatbestand konnte in Fig. 2 eine mittlere Kurve durch die Meßpunkte gezogen werden. An Hand dieser gemittelten Kurve oder einer aus ihr entwickelten Formel läßt sich für ein vorgelegtes ebenes Fachwerk mit parallelen Gurten bei zweidimensionaler Strömung normal zur Fachwerkebene der wahrscheinliche Wert des Widerstandes ohne Experiment voraussagen. In der Praxis interessiert für statische Berechnungen aus Gründen der Sicherheit aber eher der obere Grenzwert, der sicher nicht überschritten wird. Über die Wahl der Grenzkurve, die an sich beliebig hoch über die obere Streugrenze der Meßpunkte gelegt werden kann, hat die Rücksicht auf Wirtschaftlichkeit und Handlichkeit zu entscheiden. Ich schlage vor, die ausgezogene mittlere $c_{w_{r\infty}}$-Kurve durch die punktierte Grenzkurve zu ersetzen, d. h. folgende Widerstandsbeiwerte festzulegen:

φ			$c_{w_{r\infty}}$	
0	bis	0,20	2,0	
0,20	„	0,30	1,8	(15)
0,30	„	0,90	1,6	
0,90	„	1,00	2,0	

In dem weiten Bereich $\varphi = 0{,}30$ bis $0{,}90$ ergibt sich auf diese Weise ein höchst einfacher Ausdruck für den Widerstand des sehr langen Parallelträgers bei Anblasung normal zur Trägerebene:

$$W_\infty = c_{w_{r\infty}} \frac{\varrho v^2}{2} F_r \cong 1{,}6 \frac{1}{16} v^2 F_r$$

$$W_\infty = 0{,}1\, v^2 F_r [kg]^{14)} \quad (\text{gültig für } \varphi = 0{,}30 \text{ bis } 0{,}90), \tag{16}$$

wenn v in $m\,s^{-1}$ und F_r in m^2 eingesetzt werden.

Die Gültigkeit dieser Ergebnisse für Träger mit profilierten Stäben ist durch besondere Versuche sichergestellt worden. Die Berücksichtigung des Einflusses von Knotenblechen, die bei den untersuchten Modellen Nr. 1 bis 8 nicht angebracht waren, macht keine Schwierigkeiten: Knotenbleche vergrößern F_r und dadurch den Völligkeitsgrad φ.

b) Einzelne ebene Gitterfachwerke mit endlichem Seitenverhältnis. Ein ebener Fachwerkträger mit endlichem Seitenverhältnis, d. h. mit endlichem Verhältnis der Spannweite zur Trägerhöhe, hat unter sonst gleichen Bedingungen stets einen kleineren Widerstandsbeiwert als ein Träger mit unendlichem Seitenverhältnis. Die Richtigkeit dieses Satzes leuchtet sofort ein (am deutlichsten für den vollwandigen Träger $\varphi = 1$), wenn man beachtet, daß bei endlichem Seitenverhältnis eine Umströmung der

---

14) Diese einfache Formel ist bereits von Buchegger vorgeschlagen worden („Bauingenieur“ 1922, p. 491).

Schmalseiten des Trägers erfolgt, durch die von vorn kommende, unter höherem Druck stehende Luft in das Unterdruckgebiet des Totwassers eindringt. Der Unterdruck im Totwasser wird dadurch verringert, der Widerstand des Trägers also kleiner. Mit welchen Effekten man es zu tun hat, zeigt Fig. 3, in der über dem reziproken Seitenverhältnis $\frac{h}{s}$ der Quotient $\frac{c_{w_r}}{c_{w_{r\infty}}}$ für verschiedene Völligkeitsgrade φ aufgetragen ist. c_{w_r} ist dabei der Widerstandsbeiwert des betr. endlich langen Gitters mit dem Völligkeitsgrad φ, $c_{w_{r\infty}}$ der Widerstandsbeiwert des unendlich langen Gitters gleichen Völligkeitsgrades. Man erkennt aus der Abbildung — was auch anschaulich ohne weiteres klar ist —, daß der Einfluß des Seitenverhältnisses sich umso

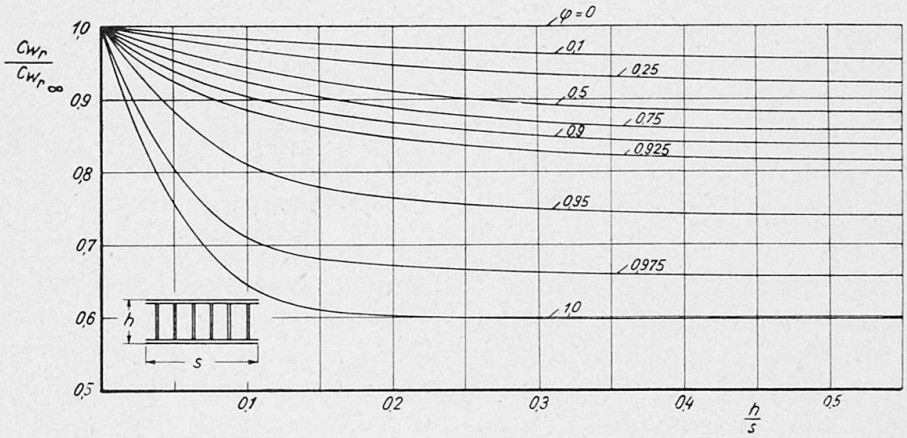

Fig. 3.

Widerstand ebener Gitterfachwerke. Abhängigkeit des Widerstandes vom Seitenverhältnis h/s und vom Völligkeitsgrad φ. (Zweidimensionale Strömung). $c_{w_{r\infty}}$ kann der Fig. 2 entnommen werden.

Résistance d'ouvrages en treillis plans. Variation de la résistance en fonction du rapport h/s et du degré de plénitude φ. (Courant à deux dimensions). $c_{w_{r\infty}}$ voir fig. 2

Resistance of plane frameworks. Dependency of the resistance on the aspect ratio h/s and the degree of solidness φ. (Two-dimensional flow). $c_{w_{r\infty}}$ see fig. 2.

stärker ausprägt, je größer φ ist. Praktisch hat man es meist mit Völligkeitsgraden $\varphi < 0{,}5$ zu tun. In diesem Bereich beträgt die Abweichung des c_{wr} vom $c_{w_{r\infty}}$ selbst bei kurzen Trägern nicht mehr als 12 %, für die praktisch überwiegend gebräuchlichen schlanken Träger mit $\frac{h}{s} < 0{,}1$ sogar nur höchstens 5 %. Das ist so wenig, daß man den Einfluß des Seitenverhältnisses, hinreichend kleinen Völligkeitsgrad vorausgesetzt, für die Zwecke der Praxis ganz vernachlässigen kann. Der begangene Fehler wirkt, da $c_{w_r} < c_{w_{r\infty}}$, stets im Sinne erhöhter Sicherheit.

Die Widerstandsbeiwerte der Gl. (15) für $\varphi < 0{,}5$ können nach dieser Überlegung bei Anblasung normal zur Gitterebene allgemein für die Berechnung parallelgurtiger Träger mit endlichem und unendlichem Seitenverhältnis benutzt werden. Für $\varphi > 0{,}5$ ist ihre Anwendbarkeit auf sehr schlanke

Träger beschränkt (vorausgesetzt, daß man keine größeren Abweichungen des c_{w_r} vom $c_{w_{r\infty}}$ in Kauf nehmen will als 12 %; läßt man 20 % zu, so gilt die Gl. (15) unabhängig vom Seitenverhältnis des Trägers in einem sehr viel größeren Bereich von Völligkeitsgraden und zwar, wie Abb. 3 zeigt, für $0 < \varphi < 0{,}93$).

c) Träger mit anderen Umrißformen. Der unendlich lange Träger mit überall gleichem Fachwerk hat den größten Widerstandsbeiwert aller ebenen Fachwerke von gleichem Völligkeitsgrad. Ich übergehe hier den Beweis. Man kann jedenfalls mit gutem Grund noch einen Schritt weiter gehen und die Gl. (15) mit den gebotenen Beschränkungen als Berechnungsgrundlage für beliebige ebene Fachwerke betrachten.

Fachwerkträger mit Knotenblechen, mit endlichem Seitenverhältnis und nicht-parallelen Gurten sind in einem Fall bereits früher untersucht worden [15]). Es handelt sich um die in Fig. 1 mit Nr. 9 bezeichneten vier Brückenträger. Die Meßergebnisse sind in Fig. 2 mit eingetragen. Sie fügen sich gut in die übrigen Werte ein und bestätigen damit zu ihrem Teil die weitreichende Gültigkeit, die wir der Gl. (15) soeben zugeschrieben haben.

d) Einzelne ebene Träger bei Schräganblasung. An den zuletzt erwähnten Brückenträgern Nr. 9 sind seinerzeit auch Versuche mit Schräganblasung ausgeführt worden. Die Ergebnisse, deren Einzelheiten man der zitierten Veröffentlichung entnehmen möge (l. c., Fußn. 15), lassen erkennen, 1. daß die bei Schräganblasung auftretenden Tangentialkräfte im allgemeinen sehr klein sind, 2. daß die Anblasung normal zur Gitterebene diejenige ist, welche die größte Kraft normal zur Gitterebene ergibt. Daraus folgt, daß die Gll. (15) und (16) allgemein als Berechnungsgrundlage für einzelne ebene Gitterträger gelten können. Die Winddruckformeln lauten demnach:

φ			c_{w_r}	W_{max}		
0	bis	0,20	2,0	$0{,}125\ v_{max}^2 F_r$	gültig für alle ebenen Gitterfachwerke	(17)
0,20	„	0,30	1,8	0,11 „ „		
0,30	„	0,50 [16])	1,6	0,10 „ „		
0,50 [16])	bis	0,90	1,6	$0{,}10\ v_{max}^2 F_r$	nur gültig für sehr schlanke ebene Gitterfachwerke [17])	(18)
0,90	„	1,0	2,0	0,125 „ „		

v_{max} in $m \cdot s^{-1}$, F_r in m^2
W_{max} normal zur Gitterebene

W_{max} ist die größte resultierende Windkraft, die auf ein Gitter, dessen Völligkeitsgrad φ und dessen Projektionsfläche F_r ist, normal zur Gitterebene

[15]) Messungen von Brückenträgern. In: 3. Liefg. d. Ergebnisse d. AVA zu Göttingen. (München und Berlin 1927).

[16]) Die Festlegung dieser Grenze ist willkürlich, sie richtet sich nach den Fehlern, die man zulassen will. Im Intervall $0 < \varphi < 0{,}50$ beträgt die Abweichung des c_{w_r} vom $c_{w_{r\infty}}$ für parallelgurtige Träger auch bei kleinem Seitenverhältnis nicht mehr als 12 %.

[17]) Für kurze Gitter liefern die Formeln wesentlich zu große Werte (Beispiel: Für den extremen Fall $h/s = 1$ liefert Formel (18) den Widerstand bei $\varphi = 0{,}50$ um 20 % zu groß, bei $\varphi = 0{,}80$ um 33 %, bei $\varphi = 1{,}0$ um 70 %).

wirkt. Die dabei auf die Längeneinheit eines einzelnen Fachwerkstabes entfallende Windlast beträgt, wenn b die Stabbreite bezeichnet, sehr angenähert $c_{w_r} \frac{\varrho v^2_{max}}{2} b$. Der Widerstandsbeiwert c_{w_r} ist den Gll. (17) und (18) zu entnehmen. Die Benutzung genauer Widerstandsbeiwerte muß selbstverständlich freigestellt bleiben.

e) Mehrere ebene Gitter hintereinander. Die Lösung des aerodynamischen Winddruckproblems für ein einzelnes ebenes Gitter ist mit dem vorstehenden Ergebnis auf eine denkbar einfache Form gebracht worden. Inwieweit dasselbe bei mehreren Gittern hintereinander möglich sein wird,

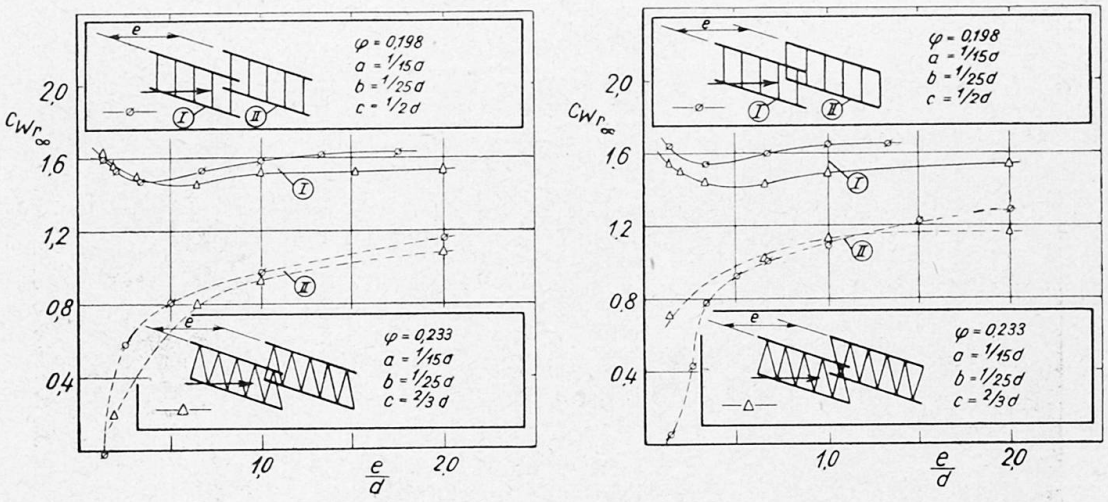

Fig. 4.

Widerstand zweier hintereinander liegender Fachwerkträger. Links: beide Träger auf Deckung. Rechts: die beiden Träger um eine halbe Feldweite gegeneinander versetzt. (Zweidimensionale Strömung).

Résistance de deux poutres en treillis placées l'une à la suite de l'autre. A gauche: les deux poutres se recouvrent. A droite: les deux poutres sont décalées d'une demi-largeur. (Courant à deux dimensions).

Resistance of two lattice girders arranged in tandem. On the left: both girders in alignment. On the right: girders offset by one-half of the width of the panel. (Two-dimensional flow).

kann noch nicht sicher beantwortet werden, da die Versuche nicht abgeschlossen sind. Die bisherigen Ergebnisse deuten aber darauf hin, daß es möglich sein wird und daß insbesondere die Reduktion auf das einzelne Gitter gelingt.

Ergebnisse aus einer Versuchsreihe mit zwei Gittern hintereinander sind in Fig. 4 mitgeteilt. Auf Grund dieser und anderer Messungen läßt sich eine vorläufige Faustformel für den Winddruck auf zwei hintereinander liegende kongruente ebene Gitter angeben. Schreibt man für den Winddruck auf den vorderen Träger

$$W_I = c_{w_r} \frac{\varrho v^2}{2} F_r, \tag{19a}$$

so ist, falls der Abstand e der beiden Träger voneinander ungefähr gleich der Trägerhöhe ist ($e \cong h$ bezw. auch $e \cong d$), angenähert

$$W_{II} = W_I k (1 - \varphi)^2. \tag{19b}$$

Dabei ist

$k \cong 1{,}0$, wenn beide Träger auf Deckung liegen (Fig. 4 links),
$k \cong 1{,}2$, wenn die beiden Träger um eine halbe Feldweite gegeneinander versetzt sind (Fig. 4 rechts).

Wie Gl. (19b) zeigt, beträgt der Winddruck auf den rückwärtigen Träger bei Anblasung normal zu den Gitterebenen für $\varphi = 0{,}20$ rd. 65—70 % des

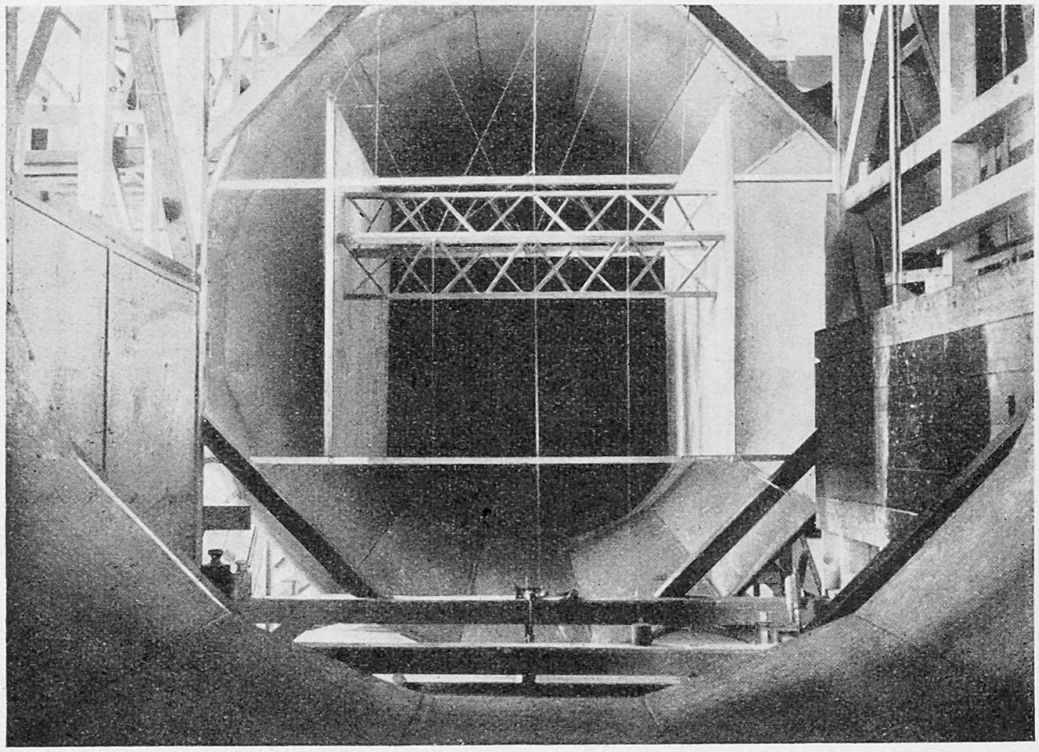

Fig. 5.

Einbau des Teilmodells eines Gittermastes im großen Windkanal der AVA Göttingen (Durchmesser der Versuchsstrecke 2,26 m). Blick in Windrichtung aus der Düse gegen die Versuchsstrecke. Die großen ebenen Scheiben beiderseits des Modells dienen zur Erzielung zweidimensionaler Strömung am Modell.

Montage du modèle partiel d'un mât en treillis dans le grand canal de l'AVA de Göttingen (Diamètre du jet: 2,26 m). Vue dans la direction du vent à partir de la tuyère vers le parcours d'essais. Les grands parois planes de chaque côté du modèle sont nécessaires à l'obtention d'un courant à deux dimensions.

Installation of a partial model of a framework mast in the large wind tunnel of the AVA in Goettingen. View of the test space as seen in the direction of the wind from the funnel of the wind tunnel. The large plane discs on both sides of the model serve to obtain a two-dimensional flow around the model.

Winddrucks auf den vorderen Träger ($W_{II} = 0{,}65$ bis $0{,}70\ W_I$), für $\varphi = 0{,}30$ rd. 50 bis 55 % ($W_{II} = 0{,}50$ bis $0{,}55\ W_I$). Der Widerstandsbeiwert c_{w_r} für den vorderen Träger ist kleiner als der Beiwert für den einzelnen Träger allein. Der Unterschied scheint aber meist so geringfügig zu sein, daß das c_{w_r} für praktische Fälle den Gll. (17) und (18) entnommen werden kann.

f) Räumliche Gitter. Mit Hilfe der Gll. (19 a und b) läßt sich bereits eine Aussage über den Widerstand eines Mastfachwerks machen, das längs der ganzen Höhe gleichen Völligkeitsgrad hat. Maste haben im allgemeinen quadratischen Grundriß. Steht der Wind normal zur Seitenfläche eines derartigen Mastes, so sind die Voraussetzungen der Gll. (19 a und b) erfüllt; der Winddruck auf den ganzen Mast ist daher einfach $W_I + W_{II}$, wenn man — was zulässig ist — die Reibung an den Seitenflächen vernachlässigt. Für die Bestimmung des Mastwiderstandes bei anderen Anblasrichtungen ist man vorerst noch auf besondere Experimente angewiesen. Wir haben derartige Versuche in Göttingen durchgeführt und gefunden, daß erstens auch bei Raumgittern der Fachwerktyp offenbar keine große Rolle spielt und daß sich zweitens die Abhängigkeit des Mastwiderstandes von der Anblasrichtung einigermaßen durch folgende Beziehung ausdrücken läßt:

$$W = \frac{\varrho v^2}{2} F_r \left\{ c_{w_r} [1 + k(1 - \varphi)^2] + \frac{\varphi - 0{,}20}{\varphi} \sin 2\alpha \right\} \tag{20}$$

Darin bedeutet F_r die Projektionsfläche, c_{w_r} den Widerstandsbeiwert einer einzelnen Seitenfläche des Gitters bei Anblasung normal zur Seitenfläche [c_{w_r} ist, falls kein genauer Wert vorliegt, den Gl. (17) und (18) zu entnehmen], α den in der Grundrißprojektion des Mastes gemessenen Winkel zwischen der Windrichtung und der Nullrichtung. Als Nullrichtung ist dabei die Normale einer Seitenfläche definiert. Die Formel ist aus Messungen gewonnen, die mit verschiedenen Mastfachwerken im Gebiet $0{,}20 < \varphi < 0{,}50$ gemacht wurden (vgl. Fig. 5) und deckt in diesem Bereich die Meßwerte sehr gut. Immerhin ist zu bedenken, daß es sich um eine vorläufige Formel für Überschlagsrechnungen handelt.

g) Winddruck auf Gitterfachwerke im örtlich ungleichförmigen Windstrom. Da der Völligkeitsgrad der praktisch vorkommenden Gitterfachwerke meist so klein ist, daß die Strömung um und durch das Fachwerk praktisch als zweidimensional betrachtet werden kann, macht die Berücksichtigung ungleichförmiger Geschwindigkeitsverteilungen keine Schwierigkeit. Man zerlegt einfach das Gitterfachwerk in Teile mit stückweise konstanten Windgeschwindigkeiten, bestimmt für diese die Teilwiderstände und ermittelt aus ihnen den Gesamtwiderstand.

Ein Schritt weiter führt dazu, außer einer ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilung auch eine ungleiche Verteilung des Völligkeitsgrades über die Trägerlänge zu berücksichtigen. Diese Aufgabe liegt z. B. bei der Winddruckberechnung von Funktürmen vor. Auch sie läßt sich ohne Schwierigkeit erledigen, wenn man das Fachwerk, also etwa den Funkturm, in einzelne Höhenabschnitte mit konstantem φ und konstantem v zerlegt. Man ermittelt dann wieder die Teilwiderstände und aus ihnen den Gesamtwiderstand. Ich habe auf diese Weise in Göttingen den Widerstand eines Abspannmastmodelles in einer ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilung, die etwa der des Windes über dem Erdboden entsprach, gerechnet und im Experiment überprüft. Die Übereinstimmung war sehr gut.

Zusammenfassung.

1. Benutzte Bezeichnungen.

ϱ = Luftdichte = $^1/_8\ kg\,s^2\,m^{-4}$ für normale Verhältnisse. μ = Zähigkeit der Luft. v = Windgeschwindigkeit. $\mathrm{v}(y)$ = Verteilung der Windgeschwindigkeit längs y. ε = Parameter der Windturbulenz (Böigkeit). l = charakteristische Längenabmessung eines Baukörpers. $R = \frac{l\,v\,\mu}{\varrho}$ = Reynolds'sche Zahl des Körpers. K = Parameter zur Kennzeichnung der Körperform. k/l = Parameter der Oberflächenrauhigkeit des Baukörpers. U = Parameter der Umrißform (bei Gitterträgern). T = Parameter des Fachwerktyps. F = Projektionsfläche des Bauwerks auf eine Ebene $\perp v$, bei Gitterfachwerken die Umrißfläche. F_r = Projektionsfläche eines Gitterfachwerkes. $\varphi = \frac{F_r}{F}$ = Völligkeitsgrad eines Fachwerkträgers. W = auf ein Bauwerk ausgeübte Windkraft. p_i = Druck an der Stelle i der Körperoberfläche. c_w = dimensionsloser Widerstandsbeiwert bezogen auf F [Definition in Gl. (1)]. ζ_i = dimensionsloser Druckbeiwert [Definition in Gl. (2)]. c_{w_r} = Widerstandsbeiwert eines Gitters, bezogen auf F_r [Definition in Gl. (12)]. c_{w_∞} bezw. $c_{w_{r\infty}}$ = Widerstandsbeiwerte eines Gitters in zweidimensionaler Strömung. α = Winkel, den die Windrichtung im Grundriß eines Gittermastes mit der Normalen auf einer Seitenfläche bildet.

2. Kurze Inhaltsangabe.

Nachdem einige Bemerkungen über die grundlegenden hydrodynamischen Tatsachen des Winddrucks (Abschnitt 1) und über die gebräuchlichen Winddruckvorschriften (Abschnitt 2) vorausgeschickt sind, wird (Abschnitt 3—7) ein Überblick über den Stand der Winddruckforschung gegeben. In den Mittelpunkt der Betrachtungen werden die systematischen Untersuchungen gestellt, mit deren Durchführung der Verfasser seit mehreren Jahren im Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung verbunden mit der Aerodynamischen Versuchsanstalt (abgekürzt: AVA) Göttingen beschäftigt ist. Die Ergebnisse werden mitgeteilt und zwar nur kurz, wenn bereits Veröffentlichungen vorliegen (Abschnitt 5 und 6: Winddruck auf vollwandige Bauwerke, der Nachweis der Veröffentlichungen ist überall gegeben), ausführlicher, soweit es sich um bislang unveröffentlichtes Material handelt (Abschnitt 7: Winddruck auf Gitterfachwerke). Hinweise auf ergänzende Untersuchungen von anderer Seite sind eingefügt.

Résumé.

1. Abréviations.

ϱ = densité de l'air = $^1/_8\ kg\,s^2\,m^{-4}$ à l'état normal. μ = viscosité de l'air. v = vitesse du vent. $\mathrm{v}(y)$ = répartition de la vitesse du vent selon y. ε = paramètre de la turbulence et des sautes du vent. l = longueur caractéristique d'une construction. $R = \frac{l\,v\,\mu}{\varrho}$ = coefficient de Reynolds de la construction. K = paramètre caractéristique de la forme de la construction. k/l = paramètre de rugosité du corps. U = paramètre caractéristique de la forme du contour (pour les poutres en treillis). T = paramètre caractéristique

du type d'ouvrage en treillis. F = projection de la construction sur un plan $\perp$ à v, pour un ouvrage en treillis: surface déterminée par les contours. F_r = projection d'un ouvrage en treillis. $\varphi = \frac{F_r}{F}$ = degré de plénitude d'une poutre en treillis. W = force exercée par le vent sur une construction. p_i = pression au point i de la surface de la construction. c_w = coefficient de résistance rapporté à F [défini par l'équation (1)]. ζ_i = coefficient de pression [défini par l'équation (2)]. c_{w_r} = coefficient de résistance d'une grille, rapporté à F_r [défini par l'équation (12)]. c_{w_∞}, $c_{w_{r\infty}}$ = coefficients de résistance d'une grille dans un courant à deux dimensions. α = angle déterminé dans le plan d'un pylône en treillis par la direction du vent et la normale à une surface latérale.

2. Sommaire.

Quelques remarques sur les phénomènes hydrodynamiques fondamentaux (chapitre 1) et sur les prescriptions usuelles concernant le calcul de la pression du vent (chapitre 2) sont suivies d'un aperçu général de l'état des recherches (chapitres 3—7). Une importance spéciale est donnée aux essais systématiques entrepris ces dernières années par l'auteur à Göttingen, au „Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung" et „Aerodynamische Versuchsanstalt" (AVA). Le compte-rendu des résultats déjà publiés (chapitres 5 et 6: Pression du vent sur les constructions à parois pleines, avec renvois aux publications) a été abrégé. Les résultats nouveaux et non encore publiés sont traités d'une manière plus détaillée (chapitre 7: Pression du vent sur les ouvrages en treillis). Les recherches complémentaires d'autres auteurs sont également mentionnées.

Summary.

1. Explanation of the symbols used.

ϱ = air density = $^1/_8\ kg\, s^2\, m^{-4}$ under normal conditions. μ = viscosity of the air. v = wind velocity. v (y) = distribution of the wind velocity along y. ε = parameter of the air turbulence. l = characteristic length of a structural body. $R = \frac{l\, v\, \mu}{\varrho}$ = Reynold's number of the body. K = parameter of the structural form. k/l = parameter of the superficial roughness of the structure. U = parameter of the contour shape (for lattice girders). T = parameter of the framework-type. F = projection of the surface of a structure on a plane normal to v, for framework structures the area of the outline. F_r = projected area of a framework structure. $\varphi = F_r/F$ = degree of solidness of a lattice girder. W = force of wind exerted on a building. p_i = pressure at a point i of the surface. c_w = non-dimensional coefficient of resistance or drag referred to F [definition in equation (1)]. ζ_i = non-dimensional coefficient of pressure [definition in equation (2)]. c_{w_r} = non-dimensional drag coefficient of a lattice referred to F_r [definition in equation (12)]. c_{w_∞} respectively $c_{w_{r\infty}}$ = drag coefficients of a lattice structure in a two-dimensional flow. α = angle between the direction of the wind in the ground-plan of a lattice mast and the direction normal to one of its sides.

2. Brief table of contents.

After a few opening remarks about the principal hydrodynamic facts concerning wind pressure (chapter 1) and the customary regulations concerning formulas for the calculation of wind pressure (chapter 2) have been made, a general view of the present state of research work on this subject is given (chapters 3—7). The systematic investigations which the author has been carrying out for several years at the „Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung" combined with the „Aerodynamische Versuchsanstalt" (abbreviated: AVA) at Göttingen, are particularly considered. The results are briefly mentioned as far as they have already been published (chapters 5 and 6: Wind pressure on solid buildings) and in each case a reference to the publication is given. A more complete survey is given of the results which have not been published as yet (chapter 7: Wind pressure on lattice structures). References to supplementary investigations which have been made elsewhere are added.