

DER STAHLBAU

Schriftleitung:
 Dr.-Ing. A. Hertwig, Geh. Regierungsrat, Professor an der Technischen Hochschule Berlin, Berlin-Charlottenburg 2, Technische Hochschule
 Fernsprecher: C 1 Steinplatz 0011
 Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage
 zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-
 samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

8. Jahrgang

BERLIN, 12. April 1935

Heft 8

Modellversuche über die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkräfte.

Alle Rechte vorbehalten.

2. Teil: Räumliche Gitterfachwerke.

Von Prof. Dr.-Ing. O. Flachsbar, Hannover, und Dr. techn. H. Winter, Göttingen.

I. Vorbemerkungen.

1. Gegenstand der Untersuchung. Rückblick auf die Ergebnisse des I. Teils.

Unter räumlichen Gitterfachwerken werden hier offene Fachwerke verstanden, die aus mehreren ebenen Gitterträgern zusammengesetzt sind. Die Gitterfachwerke der Praxis gehören fast ausnahmslos zu ihnen.

Über die Aerodynamik des einzelnen ebenen Gitterträgers ist im 1. Teil dieser Veröffentlichung berichtet worden¹⁾. Dabei zeigte sich folgendes:

Die auf einzelne ebene Gitterträger ausgeübten Tangentialkräfte sind im allgemeinen vernachlässigbar klein. Die Normalkraft (Windkraftkomponente quer zur Trägerebene) erreicht ihren Größtwert, der technisch allein interessiert, bei Windrichtung quer zur Ebene des Trägers. Sie ist mit praktisch ausreichender Genauigkeit unabhängig vom Fachwerktyp, von den Stabprofilen und vom Trägerumriß und daher proportional dem Produkt $q \cdot F$; aus Staudruck q der Windgeschwindigkeit und Ansichtsfläche F_r des Trägers. Wir haben den Proportionalitätsfaktor mit c_{w_r} bezeichnet und Windkraftzahl genannt. Eine leichte Abhängigkeit der Windkraftzahl vom Volligkeitsgrad φ des Fachwerks kann in einer den Anforderungen der Praxis meist genügenden Weise berücksichtigt werden durch folgende Vorschrift: Man setze

für Volligkeitsgrade $\varphi < 0,25$ die Windkraftzahl $c_{w_r} = 1,8$

für Volligkeitsgrade $\varphi \geq 0,25$ die Windkraftzahl $c_{w_r} = 1,6$.

Dann ergibt sich bei vorgegebener Windgeschwindigkeit v die Windkraft W quer zu einem Gitterträger von bekanntem Volligkeitsgrad φ und bekannter Ansichtsfläche $F_r = \varphi \times$ Umrißfläche F zu

$$W = c_{w_r} \cdot q \cdot F_r = c_{w_r} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 F_r \quad [\text{kg}],$$

wobei ρ die Luftdichte bezeichnet. Wenn im Einzelfall genauere c_{w_r} -Werte aus Messungen vorliegen, wird es sich empfehlen, sie zu benutzen; das gilt besonders im Gebiet $\varphi < 0,25$, für das die Beziehung $c_{w_r} = 1,8$ eine etwas rohe Annäherung an die wirklichen Verhältnisse bedeutet. Für $\varphi > 0,25$ wird dagegen der physikalische Tatbestand durch $c_{w_r} = 1,6$ technisch zutreffend wiedergegeben.

Wesentlich ist die in diesen Bemerkungen zum Ausdruck kommende Tatsache, daß das c_{w_r} des einzelnen ebenen Gitterträgers praktisch allein eine Funktion des Volligkeitsgrades φ ist, noch dazu eine sehr einfache, da sich die Abhängigkeit von φ nur bis etwa $\varphi = 0,25$ bemerkbar macht, darüber hinaus, d. h. im Bereich der praktisch überwiegend vorkommenden Volligkeitsgrade, ist $c_{w_r} \approx \text{const}$.

Ein so einfaches Ergebnis kann für räumliche Fachwerke, bei denen wegen der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Träger ungleich verwickeltere Verhältnisse herrschen, von vornherein nicht erwartet werden. Die aerodynamischen Zusammenhänge sind in der Tat nicht auf gleich einfache Formeln zu bringen. Die Versuche, über die wir im folgenden berichten, belegen das. Immerhin sind ihre Ergebnisse übersichtlich genug, um die Grundlage für ein noch immer handliches, den heutigen Winddruckvorschriften an Treßsicherheit überlegenes Berechnungsverfahren zu bilden. Die Handlichkeit des Verfahrens ist gesichert, weil es gelang, die Windbelastung eines räumlichen Fachwerks in verhältnismäßig einfacher Weise zurückzuführen auf die Windbelastung des einzelnen Gitterträgers.

2. Bezeichnungen.

Die Mehrzahl der benutzten Begriffe und Bezeichnungen ist bereits im 1. Teil erklärt. Neu werden hier folgende Bezeichnungen eingeführt:

¹⁾ O. Flachsbar, Modellversuche über die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkräfte. 1. Teil: Einzelne ebene Gitterträger (Stahlbau 1934, Heft 9 u. 10, S. 65 u. 73), hier kurz zitiert als „1. Teil“.

e [m] Abstand zwischen zwei parallelen Trägern; meist in der dimensionslosen Form e/d verwendet, wo d den Abstand zwischen den Mittellinien der beiden Gurte eines Gitterträgers bezeichnet,

$c_{w_{r I}}$ bei zwei parallel hintereinander liegenden Gitterträgern die Widerstandszahl des windseitigen Trägers (Widerstandszahl des vorderen Trägers „im Verbande“),

$c_{w_{r II}}$ entsprechend die Widerstandszahl des dem Winde abgewandten Trägers,

$c_{w_r}^{(e = \infty)}$ Widerstandszahl des einzelnen Trägers oder — was dasselbe besagt — Widerstandszahl des vorderen bzw. rückwärtigen Trägers beim Trägerabstand $e = \infty$,

$\psi_I = \frac{c_{w_{r I}}}{c_{w_r}^{(e = \infty)}}$ Abschirmungszahl des vorderen Trägers,

$\psi_{II} = \frac{c_{w_{r II}}}{c_{w_r}^{(e = \infty)}}$ Abschirmungszahl des rückwärtigen Trägers,

$\eta = \frac{\psi_{II}}{\psi_I}$ Abschirmungsverhältnis der beiden Träger,

P_g [kg] die auf ein räumliches Fachwerk ausgeübte gesamte resultierende Kraft

W_g [kg] desgl. Widerstand

A_g [kg] „ Auftrieb bzw. Quertrieb

N_g [kg] „ Normalkraft

T_g [kg] „ Tangentialkraft

$C_{p_r} = P_g / q \cdot F_r$ Zugehörige Windkraftzahlen für die auf das räumliche Fachwerk ausgeübten Gesamtkräfte; durch großes C bezeichnet zum Unterschied von den mit kleinem c bezeichneten Windkraftzahlen für die auf einen einzelnen ebenen Gitterträger ausgeübten Kräfte. F_r bedeutet beim räumlichen Fachwerk stets die Ansichtsfläche eines Trägers, bei einem Gittermast z. B. die Ansichtsfläche einer Seitenwand, bei einer Brücke mit zwei Hauptträgern die Ansichtsfläche eines Hauptträgers.

Soweit nichts anderes bemerkt ist, wird auch hier wieder vorausgesetzt, daß der Windstrom örtlich und zeitlich gleichförmig oder doch sehr angenähert gleichförmig ist.

II. Zwei parallel hintereinander liegende Gitterträger (Trägerpaar).

1. Grundsätzliches.

Wir betrachten zwei parallel hintereinander liegende Gitterträger. Ein solches Trägerpaar kann als Elementarform eines räumlichen Fachwerks gelten. Vorausgesetzt wird, daß es sich um Träger gleicher Höhe, gleicher Spannweite, gleichen Umrisses, gleichen Fachwerktyps und gleichen Volligkeitsgrades handelt. Damit ist nicht gesagt, daß sie kongruent sein sollen; vielmehr wird eine Inkongruenz insofern zugelassen, als die Feldteilungen der beiden Träger gegeneinander versetzt sein können.

Bezeichnen wir den vorderen Träger mit I, den rückwärtigen mit II und entsprechend die Widerstände mit W_I und W_{II} , so ist der gesamte Widerstand der beiden Träger.

$$(1) \quad W_g = W_I + W_{II}$$

Für Queranströmung ist diese Kraft gleichbedeutend mit der resultierenden Normalkraft N_g . Dividieren wir auf beiden Seiten durch das Produkt $q \cdot F_r$, so geht Gl. (1) über in die entsprechende Beziehung zwischen den Widerstandszahlen

$$(2a) \quad c_{w_r} = c_{w_{r I}} + c_{w_{r II}}$$

NB. Die auf einen ebenen Gitterträger des räumlichen Fachwerks ausgeübten Kräfte haben den Zeiger g nicht: P, W, A, N, T (vgl. 1. Teil).

wofür sich auch schreiben läßt

$$(2b) \quad c_{w_r} = c_{w_{r1}} \left(1 + \frac{c_{w_{r11}}}{c_{w_{r1}}} \right)$$

oder mit den im Abschnitt I, 2 vereinbarten Bezeichnungen

$$(2c) \quad c_{w_r} = c_{w_{r1}} (1 + \eta)$$

In diesen Gleichungen ist zunächst alles unbekannt. Wir kennen weder c_{w_r} , noch $c_{w_{r1}}$, noch $c_{w_{r11}}$. Das einzige, was wir kennen, was aber bislang in den Gleichungen noch nicht vorkommt, ist die Widerstandszahl des einzelnen Trägers, wenn er allein vorhanden ist oder — anders ausgedrückt — wenn der zweite Träger in einer Entfernung $e = \infty$ liegt (vgl. 1. Teil, etwa Bild 21). Wir wollen diese Widerstandszahl, die früher einfach c_{w_r} genannt wurde, hier, um Mißverständnissen vorzubeugen, vorübergehend mit $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ bezeichnen. Über die Beziehung zwischen diesem Wert und den Zahlen $c_{w_{r1}}$ und $c_{w_{r11}}$ können wir nun jedenfalls eine, wenn auch sehr allgemeine Aussage machen. Offenbar liegt der vordere Träger im Staugebiet des rückwärtigen und der rückwärtige Träger im Totluftgebiet des vorderen. Jeder der beiden Träger liegt daher bei Anwesenheit des anderen in einem gestörten Strömungsfelde. Daraus folgt, daß

$$\left. \begin{matrix} c_{w_{r1}} \\ c_{w_{r11}} \end{matrix} \right\} \pm c_{w_r}^{(e=\infty)}$$

Schreiben wir statt dessen

$$(3) \quad c_{w_{r1}} = \psi_1 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)} \quad \text{und} \quad c_{w_{r11}} = \psi_{11} \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)},$$

so lassen sich die Gl. (2) überführen in

$$(4) \quad \left\{ \begin{matrix} c_{w_r} = \psi_1 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)} \left(1 + \frac{\psi_{11}}{\psi_1} \right) \\ c_{w_r} = \psi_1 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)} (1 + \eta) \end{matrix} \right. \quad \text{oder}$$

Hierin ist jetzt $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ eine bekannte Größe: die Widerstandszahl des einzelnen Trägers bei Abwesenheit des anderen. Damit ist formal der Anschluß an die Aerodynamik des einzelnen Trägers gewonnen.

Über ψ_1 und ψ_{11} bzw. ψ_1 und η , im besonderen über ihre Abhängigkeit von Trägerabstand, Völligkeitsgrad und anderen Parametern müssen besondere Versuche Auskunft geben. Man vergleiche dazu die folgenden Abschnitte. Voraussagen läßt sich vorerst nur so viel: Da das Totluftgebiet hinter einem umströmten Körper im wesentlichen ein Bereich vermindelter Geschwindigkeit ist, muß sein

$$\psi_{11} < 1,0,$$

d. h. der Widerstand eines Trägers, der im Windschatten eines anderen liegt, ist kleiner als der Widerstand desselben Trägers bei Abwesenheit des anderen.

Es ist daher sinnvoll, ψ_{11} als Abschirmungszahl des zweiten Trägers zu bezeichnen. Man wird dann zweckmäßig ψ_1 die Abschirmungszahl des vorderen Trägers nennen und $\eta = \frac{\psi_{11}}{\psi_1}$ das Abschirmungsverhältnis der beiden Träger.

2. Versuche an zwei vollwandigen Platten ($\varphi = 1$).

Es ist angebracht, wie beim einzelnen Träger so auch beim Trägerpaar auszugehen vom Völligkeitsgrad $\varphi = 1$.

In Bild 1 sind Ergebnisse von Messungen an vier verschiedenen Plattenpaaren aufgetragen. Es handelt sich um ältere Messungen Eiffels an Kreisscheiben und an Rechteckplatten vom Seitenverhältnis $\lambda = l/h = 2^2$, um Messungen am sogenannten Träger ①, die 1921 in Göttingen im Auftrage des Deutschen Stahlbau-Verbandes ausgeführt wurden²⁾, und endlich um eine zusätzliche Messung, die wir an einer Rechteckplatte $\lambda = 13,6$ vorgenommen haben.

Aufgetragen sind über dem Verhältnis $e : h =$ Plattenabstand : Plattenhöhe die Abschirmungszahlen ψ_1 für die windseitige Platte und ψ_{11} für die dem Wind abgewandte Platte. Zur Erleichterung des Verständnisses sei daran erinnert, daß z. B. eine Ablesung $\psi_1 = 0,84$ für $e/h = 3,0$ bedeutet: Wenn der Abstand e zwischen den beiden Platten des betreffenden Plattenpaares gleich dem 3fachen der Plattenhöhe ist, dann erfährt die vordere Platte (I) eine Windkraft in Windrichtung, die nur 84% derjenigen Windkraft beträgt, die auf die gleiche Platte unter sonst gleichen Verhältnissen ausgeübt wird, wenn die zweite Platte (II) nicht da ist.

Wir entnehmen Bild 1 die folgenden Tatsachen:

a) Der Verlauf der ψ -Kurven ist abhängig von der Plattenform. Das entspricht der Erwartung, da schon der Widerstand der Einzelplatte sich als stark abhängig von der Plattengestalt erwies.

b) ψ_1 liegt für die untersuchten Platten und für den Bereich der untersuchten Abstände ($e \leq 8h$) zwischen 0,8 und 1,1, also sehr nahe

um 1,0 herum. Das bedeutet, daß die Wirkung des rückwärtigen auf den vorderen Träger auch bei kleinen Abständen nicht sehr groß ist. Es zeigt aber gleichzeitig, daß infolge der Anwesenheit der zweiten Platte der Widerstand der vorderen größer werden kann als der Widerstand der einzelnen Platte (die Zunahme ist anscheinend bei gedungenen Plattenformen — Kreisscheibe, Rechteckplatte $\lambda = 2$ — stärker als bei den technisch fast ausschließlich interessierenden schlanken Platten). Mit wachsendem Abstand muß sich ψ_1 mehr und mehr dem Wert 1,0 nähern.

c) Die Beeinflussung der rückwärtigen Platte durch die vordere ist erheblich. Im Bereich kleiner Abstände — bis zum 2- und Mehrfachen der Plattenhöhe, je nach der Plattengestalt — nimmt ψ_{11} sogar negative Werte an, d. h. die rückwärtige Platte erfährt eine Windkraft entgegen der Windrichtung. Mit wachsendem Abstand Übergang des ψ_{11} zu positiven Werten. Auch in diesem Fall muß sich die Abschirmungszahl schließlich dem Grenzwert 1,0 beliebig nähern. Daß das aber langsamer geschieht, als man anzunehmen vielleicht geneigt ist, zeigt die Tatsache, daß selbst bei einem Plattenabstand gleich dem 8fachen der Plattenhöhe der Widerstand der rückwärtigen Platte noch immer um rd. 50% kleiner ist als der Widerstand der Einzelplatte.

Auf Grund dieser Ergebnisse können wir einige Voraussagen über das Verhalten zweier Gitterträger machen, die kongruent sind und — quer zu ihrer Netzebene gesehen — auf Deckung liegen. Wir deuten zu diesem Zweck die vollwandigen Platten des Bildes 1 als Teile eines Gitterfachwerks, etwa die Rechteckplatte $\lambda = 13,6$ als Stab von der Breite h .

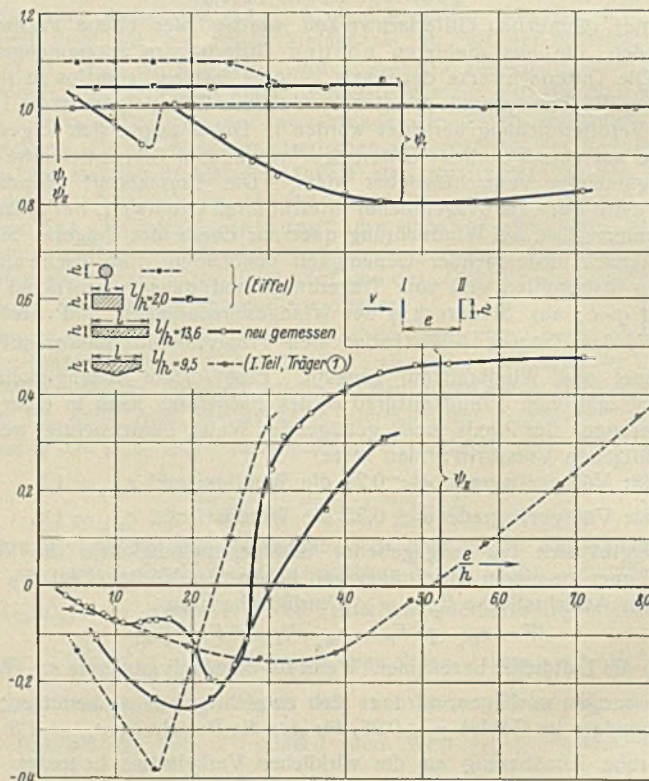


Bild 1. Abschirmungszahlen zweier parallel hintereinander liegender, quer angeströmter vollwandiger Platten.

Dann folgt: Liegen zwei quer angeströmte Gitterträger auf Deckung hintereinander, so muß erwartet werden:

für Abstände e bis zum 2- bis 5fachen der Stabbreite $\psi_{11} < 0$ und, zum mindesten in einem Teilgebiet, $\psi_1 > 1,0$,

für größere Abstände $\psi_{11} \rightarrow 1,0$, $\psi_1 \rightarrow 1,0$, aber so, daß sich ψ_1 schneller dem Grenzwert 1,0 nähert als ψ_{11} .

Das gilt zunächst für auf Deckung liegende Träger mit platten Stäben, also für „schematisierte“ Träger. Aber die Ergebnisse des 1. Teils berechtigen uns, die Überlegungen auch als gültig für Träger mit profilierten Stäben zu betrachten.

Handelt es sich um Gitterträger, deren Felder gegeneinander versetzt sind, so kann sich nichts Wesentliches ändern, solange die Trägerabstände groß sind. Für kleine Abstände ist mit Abweichungen zu rechnen, da die vom vorderen Träger nicht verdeckten Teile des rückwärtigen Trägers das Strömungsfeld merklich beeinflussen können. Genaueres läßt sich darüber nicht voraussagen.

Wir werden im Abschnitt II, 4, sehen, daß die Vorstellungen, die wir uns hier vom aerodynamischen Verhalten eines Trägerpaares entwickelt haben, zutreffen. Vorher seien im Anschluß an besondere Messungen noch einige Bemerkungen über das Strömungsfeld hinter einem einzelnen Gitterträger gemacht. Sie werden dazu dienen, das Verhalten des rückwärtigen Trägers eines Trägerpaares, für den nach Bild 1 erhebliche Abweichungen der Widerstandszahl $c_{w_{r11}}$ vom $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ erwartet werden müssen, verständlicher zu machen.

²⁾ G. Eiffel, La résistance de l'air et l'aviation. 1. éd. Paris 1910, 2. éd. Paris 1911; deutsch von F. Huth, Berlin 1912. Vgl. auch den Bericht über die Eiffelschen Versuche in D. Banki, Energie-Umwandlungen in Flüssigkeiten, 1. Bd., S. 446 u. 447 und 461 bis 463. Berlin 1921.

³⁾ AVA III, S. 146 ff. und 1. Teil, Bild 20.

Bild 2a. Verteilung der Gesamt- und der statischen Drücke.

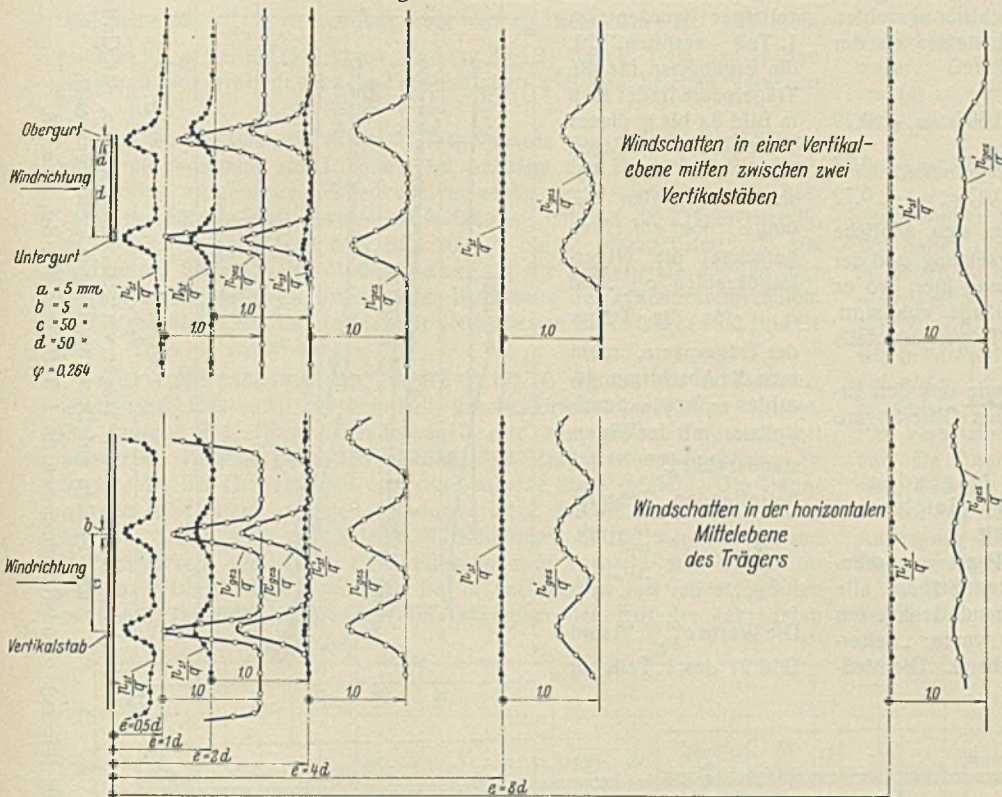


Bild 2b. Verteilung der Geschwindigkeiten.

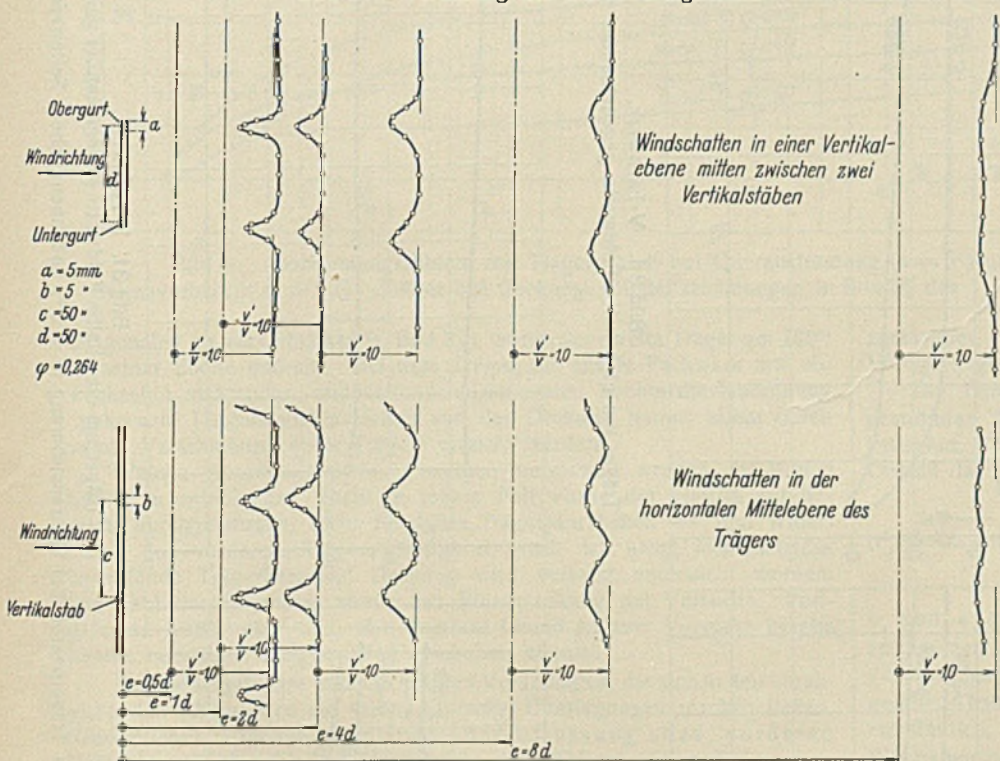


Bild 2a u. b. Druck- und Geschwindigkeitsfeld hinter einem quer angeströmten Leiterfachwerk. Die Abstände e sind hier ausnahmsweise von der Rückseite des Trägers aus gemessen und nicht (wie in allen anderen Fällen) von der mittleren Netzebene des Trägers aus.

3. Das Druck- und Geschwindigkeitsfeld hinter einem quer angeströmten Gitterträger.

Mit Hilfe eines kleinen Hakenrohres und einer kleinen statischen Sonde wurde in fünf Parallelebenen hinter einem „Leitermodell“ die Verteilung des Gesamtdruckes p'_{ges} und des statischen Druckes p'_{st} gemessen. Aus p'_{ges} und p'_{st} erhält man den örtlichen Staudruck $q' = \frac{1}{2} \rho v'^2$ zu

$$q' = p'_{ges} - p'_{st} \quad [\text{kg/m}^2]$$

und daraus die örtliche Geschwindigkeit v' zu

$$v' = \sqrt{\frac{2q'}{\rho}} \quad [\text{m/s}].$$

⁴⁾ Die örtlichen Drücke und Geschwindigkeiten sind mit einem Apostroph versehen, um sie von den entsprechenden Größen der ungestörten Strömung (z. B. v und q) zu unterscheiden.

In Bild 2a ist die Verteilung der Gesamt- und der statischen Drücke aufgetragen, in Bild 2b die Verteilung der Geschwindigkeiten. Die Geschwindigkeiten wurden auf die ungestörte Windgeschwindigkeit v bezogen, die Drücke auf den Staudruck $q = \frac{1}{2} \rho v^2$.

Aufgetragen sind daher $\frac{p'_{ges}}{q}$, $\frac{p'_{st}}{q}$, $\frac{v'}{v}$. Der Abstand e der Meßebenen vom Träger ist in Vielfachen der Gurthöhe d ausgedrückt.

Die Verteilungskurven zeigen den zu erwartenden welligen Verlauf, hinter den Stäben Minima, hinter den freien Feldmitten Maxima. Die Welligkeit der Kurven klingt mit wachsendem Abstand ab. Verhältnismäßig schnell ist der statische Druck ausgeglichen⁵⁾. Dagegen vollzieht sich der Ausgleich des Gesamtdruckes und infolgedessen auch der der Geschwindigkeit langsam. Die Ausbreitung der Windschattengebiete hinter den einzelnen Stäben ist deutlich zu verfolgen. Im Abstand $e = 8d$ haben sich die Windschatten gegenseitig durchsetzt (bei einem dichteren Fachwerk würde das bereits in kleinerem Abstand der Fall sein).

Dieses Strömungsfeld ist für einen zweiten Träger, der in Windrichtung gesehen hinter dem ersten eingebaut wird, das ungestörte — d. h. durch ihn selbst nicht gestörte Feld. Denkt man sich daher im Abstand e/d einen zweiten kongruenten Träger auf Deckung eingebaut und bezeichne \bar{v}' die mittlere Geschwindigkeit am Ort der Stäbe des zweiten Trägers vor seinem Einbau, so muß ungefähr sein (es kann sich nur um Abschätzungen handeln)

$$c_{w_{rII}} \approx \left(\frac{\bar{v}'}{v}\right)^2 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)} \quad \text{bzw.}$$

$$\psi_{II} \approx \frac{c_{w_{rII}}}{c_{w_r}^{(e=\infty)}} \approx \left(\frac{\bar{v}'}{v}\right)^2,$$

denn die Windkräfte ändern sich — genügend große Reynoldssche Zahlen vorausgesetzt — proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit. Infolgedessen lassen sich auf Grund der Ausmessung des Strömungsfeldes hinter einem Gitterträger (Bild 2b) folgende Aussagen machen (Ihre Zuverlässigkeit läßt sich an Hand von Bild 3 sofort kontrollieren):

a) Die Störung des Geschwindigkeitsfeldes hinter einem Gitterträger klingt langsam ab. Die abschirmende Wirkung des vorderen auf den rückwärtigen Träger eines Trägerpaares muß daher noch bei großen Trägerabständen merklich sein. Für Fälle, die dem untersuchten etwa entsprechen ($\varphi = 0,264$) darf man für $e/d = 8$, d. h. für einen Trägerabstand von nahezu der 8fachen Trägerhöhe, erwarten:

$$\frac{\bar{v}'}{v} = 0,85 \quad \psi_{II} \approx \left(\frac{\bar{v}'}{v}\right)^2 \approx 0,72.$$

Dabei kann es wenig ausmachen, ob die Träger auf Deckung liegen oder nicht, denn infolge der Vermischung der Windschatten ist die Geschwindigkeit im gestörten Gebiet schon ziemlich einheitlich geworden. Das gilt für große Abstände.

b) Im Gegensatz hierzu muß es für kleinere Abstände wesentlich sein, ob die Träger auf Deckung liegen oder nicht. Im ersten Fall befinden sich alle Stäbe des rückwärtigen Trägers in den deutlich ausgeprägten Geschwindigkeitsdellen des vom vorderen Träger ausgehenden Windschattens. Im zweiten Fall liegen Teile des zweiten Trägers in den Gebieten

großer Geschwindigkeit. Eine Abschätzung der ψ_{II} -Werte stößt allerdings auf Schwierigkeiten. Die starke örtliche Veränderung der Geschwindigkeit beeinflusst die Umströmung der Stäbe des zweiten Trägers in nicht zu übersehender Weise. Aber selbst wenn man davon absieht, bleibt angesichts der schmalen Minima in den Geschwindigkeitsdellen die Frage offen, welche Geschwindigkeit die aerodynamisch wirksame ist. Immerhin kann man Schranken für die ψ_{II} -Werte zweier auf Deckung liegender Träger von dem in Bild 2a u. b. untersuchten oder von ähnlichem Typ angeben. Setzt man als \bar{v}' das örtliche v'_{min} der Dellen an,

⁵⁾ Auf Grund von Bild 2a könnte man vermuten, daß der statische Druck in größerer Entfernung hinter dem Gitter wieder ansteigt. Das ist in Wahrheit nicht der Fall. Der gemessene kleine Druckanstieg hängt mit dem nicht ganz gleichmäßigen Druckverlauf längs der Achse des Windkanalfreistrahlens zusammen.

das sicher kleiner ist als die aerodynamisch wirksame Geschwindigkeit, so wird man z. B. erwarten dürfen, daß die wirklichen Abschirmungszahlen größer sind als die mit v'_{min} errechneten und jedenfalls kleiner als der oben für $e/d=8$ ermittelte Wert $\psi_{II} \approx 0,72$:

$e/d = 4$	$\frac{v'_{min}}{v} = 0,78$	$\left(\frac{v'_{min}}{v}\right)^2 = \text{rd. } 0,60$	$0,60 < \psi_{II} < 0,72$
$e/d = 2$	$\frac{v'_{min}}{v} = 0,68$	$\frac{v'_{min}}{v} = 0,46$	$0,46 < \psi_{II} < 0,72$
$e/d = 1$	$\frac{v'_{min}}{v} = 0,66$	$\frac{v'_{min}}{v} = 0,43$	$0,43 < \psi_{II} < 0,72$

Für das ψ_{II} axial gegeneinander versetzter Träger ließen sich ähnliche Abschätzungen machen. Da dabei aber das Maß der Versetzung und der Fachwerktyp als Parameter eingehen, mag die Durchführung hier, wo es nur auf die Erörterung der grundlegenden Zusammenhänge ankommt, unterbleiben. Es genügt zu bemerken, daß ψ_{II} für versetzte Träger jedenfalls größer ist als für auf Deckung liegende.

Nach diesen vorbereitenden Bemerkungen können wir uns den Ergebnissen der Messungen an zwei hintereinander liegenden Gitterträgern zuwenden.

4. Versuche an zwei parallel hintereinander liegenden Gitterträgern gleichen Fachwerktyps und gleichen Völligkeitsgrades bei Queranströmung.

Es wurden zwölf Trägerpaare untersucht, davon elf Paare aus schematisierten Trägern, ein Paar aus Trägern mit profilierten Stäben, alle Träger von unendlichem Seitenverhältnis ($\lambda = \infty$). Es handelt sich um Gitterträger, die als Einzelträger bereits vorher untersucht waren: „Leiterfachwerke“, Parallelträger mit V-Verband und mit N-Verband. Die Meß-

ergebnisse für die Einzelträger wurden im 1. Teil veröffentlicht, die Ergebnisse für die Trägerpaare findet man in Bild 3a bis g dieses 2. Teils. Aufgetragen sind hier die Abschirmungszahlen ψ_1 und ψ_{II} über e/d . Man berechnet die Widerstandszahlen $c_{w_{r1}}$ und $c_{w_{rII}}$ für die Träger der Trägerpaare, indem man die Abschirmungszahlen ψ_1 bzw. ψ_{II} multipliziert mit der Widerstandszahl $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ des betreffenden Trägers:

$$c_{w_{r1}} = \psi_1 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)}$$

$$c_{w_{rII}} = \psi_{II} \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)}$$

Die Werte $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ sind Bild 21 des 1. Teils zu

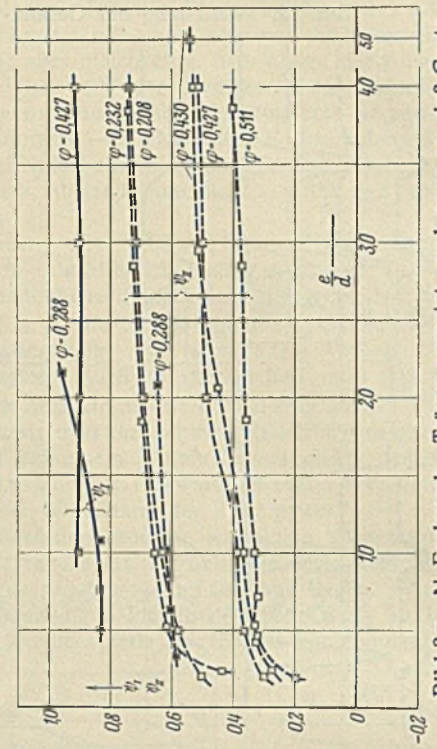


Bild 3g. N-Fachwerk. Träger versetzt, und zwar so, daß Gurte und Pfosten auf Deckung, Diagonale auf Deckung. Modellzeichnungen im 1. Teil, Bild 8b, 8g, 10 u. 18.

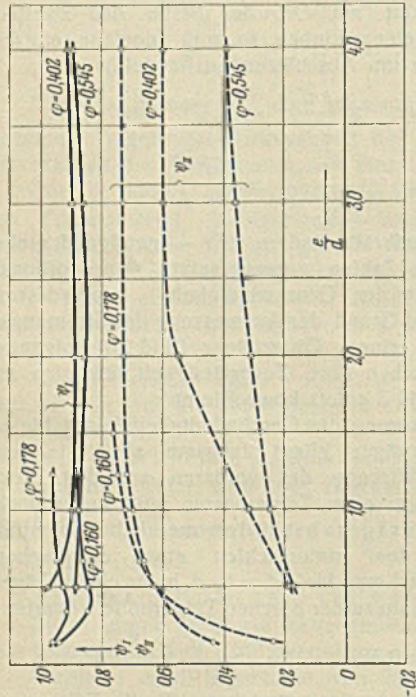


Bild 3b. Leiterfachwerk. Träger um eine halbe Feldweite gegeneinander versetzt.

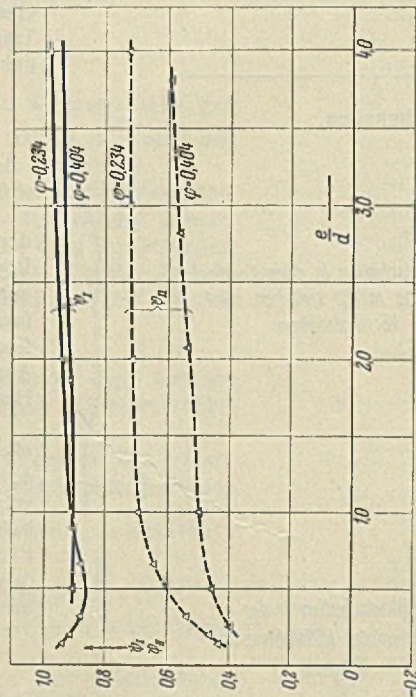


Bild 3d. V-Fachwerk. Träger um eine halbe Feldweite gegeneinander versetzt.

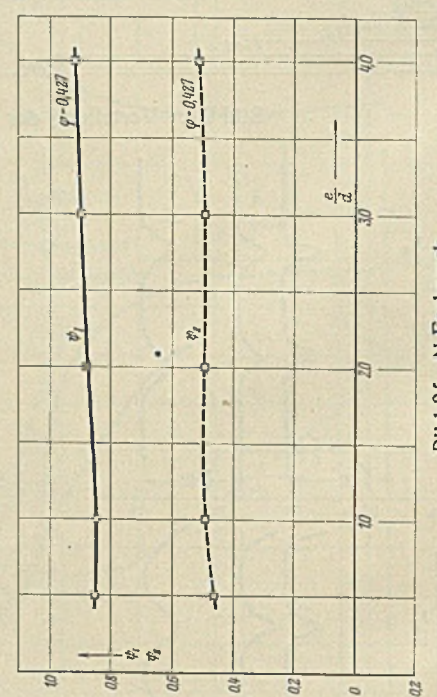


Bild 3f. N-Fachwerk. Träger um eine halbe Feldweite gegeneinander versetzt.

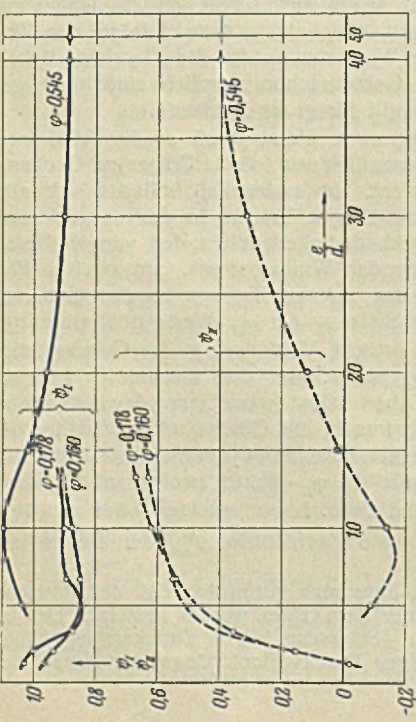


Bild 3a. Leiterfachwerk. Träger auf Deckung.

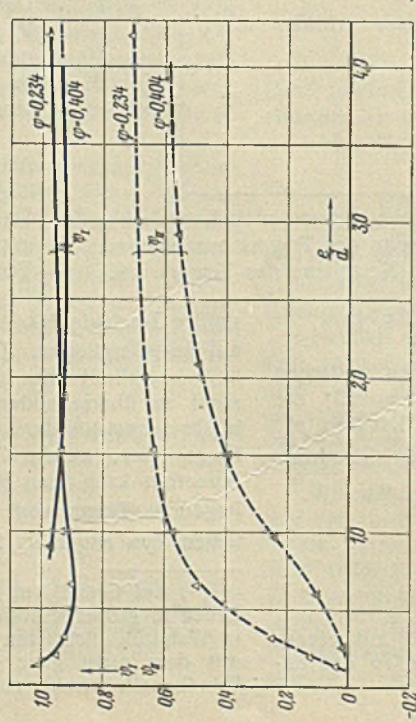


Bild 3c. V-Fachwerk. Träger auf Deckung.

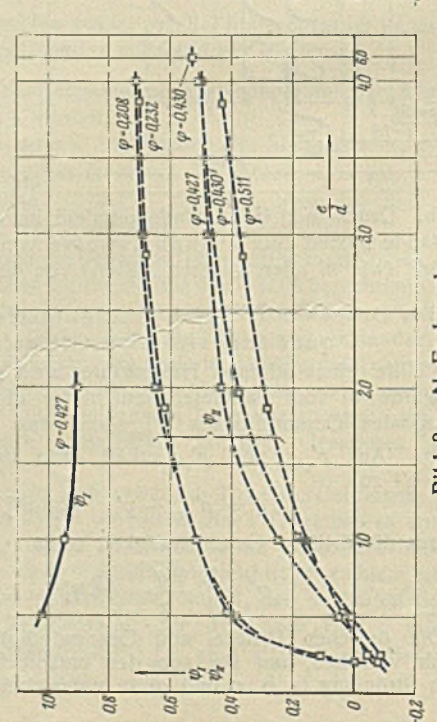


Bild 3e. N-Fachwerk. Träger auf Deckung.

Bild 3a bis g. Abschirmungszahlen von Trägerpaaren bei Queranströmung ($\alpha = 0^\circ$) und unendlichem Seitenverhältnis ($\lambda = \infty$).

entnehmen. Man beachte nur, daß die Widerstandszahl des Einzelträgers dort nicht mit $c_{w_r}^{(e=\infty)}$, sondern kurz mit c_{w_r} bezeichnet ist. Die Meßpunkte für gleiche Trägertypen sind in Bild 21 des 1. Teils und in den Bildern 3 des vorliegenden 2. Teils mit den gleichen Zeichen versehen (○, △ usw.).

Zu den Messungen an zwölf Trägerpaaren von unendlichem Seitenverhältnis kommen aus früheren, im Auftrage des Deutschen Stahlbau-Verbandes ausgeführten Windkanalversuchen noch Messungen an vier Trägerpaaren von endlichem Seitenverhältnis. Es sind die Trägertypen ② bis ⑤ des 1. Teils (vgl. dort Bild 20), ② bis ④ schematisiert, ⑤ aus profilierten Stäben. Die Meßergebnisse für die Trägerpaare werden hier in Bild 4 mitgeteilt, gleichfalls unter Benutzung der Abschirmungszahlen. Die zugehörigen Windkraftzahlen für die isolierten Einzelträger sind Bild 21 des 1. Teils zu entnehmen.

Die Trägerpaare aus den Trägern ② bis ⑤ wurden nur auf Deckung untersucht. Das entspricht dem Fall, der bei Brückenüberbauten vorliegt. Die übrigen Trägerpaare (Parallelträger) sind zum großen Teil auch mit versetzten Trägern gemessen worden, um Verhältnissen Rechnung zu tragen, die bei Gittermasten und -türmen eine Rolle spielen. Die Träger wurden dabei stets so gegeneinander versetzt, daß die Gurte auf Deckung blieben. Das Maß der axialen Verschiebung betrug bei Leiter- und V-Fachwerken eine halbe Feldweite; beim V-Verband erhielt man so gekreuzte Diagonalen. Um auch bei N-Fachwerken mit nur steigenden oder nur fallenden Diagonalen im Trägerpaar den Fall der gekreuzten

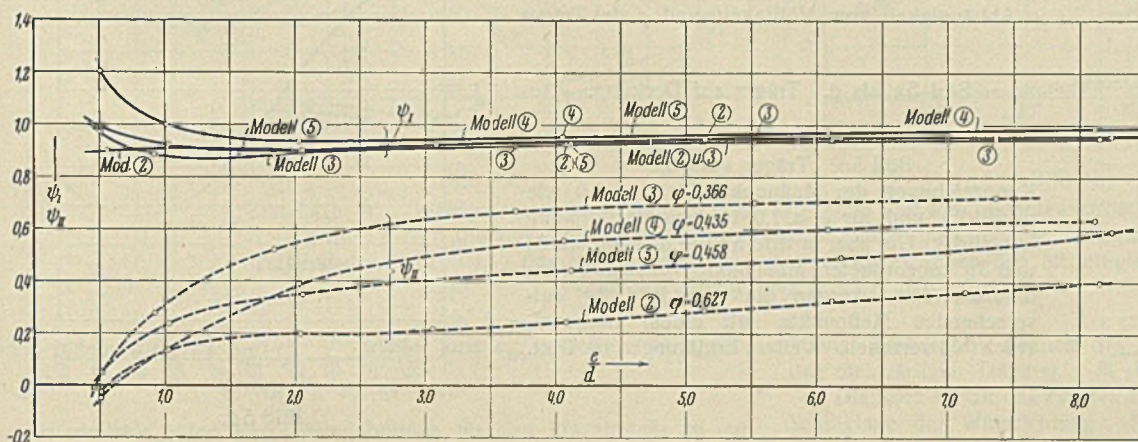


Bild 4. Abschirmungszahlen von Trägerpaaren bei Queranströmung ($\alpha = 0^\circ$) und endlichem Seitenverhältnis ($\lambda = 9,5$). Träger auf Deckung. Modellzeichnungen in Bild 20 des 1. Teils. Nach AVA III.

Diagonalen zu verwirklichen (s. Bild 3g), wurde der zweite Träger um 180° in seiner Ebene gedreht. Bei dem Trägerpaar aus N-Fachwerk mit abwechselnd steigenden und fallenden Diagonalen konnte die Anordnung „gekreuzte Diagonalen“ natürlich aus der Deckung heraus allein durch axiale Verschiebung eines Trägers erreicht werden.

Welche Anordnungen im einzelnen untersucht wurden, ist Bild 3 und 4 zu entnehmen. Nicht in jedem Fall wurde der gleiche e/d -Bereich durchgemessen, nicht für jedes Trägerpaar haben wir den Widerstand des vorderen Trägers bestimmt, auch ist nicht jedesmal das betreffende Trägerpaar auf Deckung und versetzt untersucht worden. Die Zahl der Parameter zwang zur Einschränkung der Versuche. Fortgelassen wurde aber nur, was man auf Grund anderer Versuche bereits kannte oder doch einigermaßen übersehen konnte.

Die Meßergebnisse entsprechen den Voraussagen, die sich in den vorangehenden Abschnitten auf Grund einfacher Überlegungen machen ließen. Wesentliches Ergebnis: geringe Beeinflussung des vorderen Trägers, starke Abschirmwirkung am rückwärtigen Träger.

$\psi_1 = 0,8$ bis $1,1$, dabei für normale Völligkeitsgrade $\psi_1 < 1,0$, jedenfalls im Bereich $e/d > 1,0$; aber selbst für den sehr großen Völligkeitsgrad $\varphi = 0,511$ ist bei Trägern auf Deckung (d. h. in dem für den vorderen Träger ungünstigsten Fall) und $e/d = 1,0$ die Abschirmungszahl ψ_1 nur wenig größer als $1,0$. Da Trägerabstände $e/d < 1,0$ praktisch fast ganz außer Betracht bleiben können, ist $\psi_1 = 0,9$ oder auch $\psi_1 = 1,0$ ein ausreichender Näherungswert. Er gilt unabhängig vom Völligkeitsgrad und gleichgültig, ob die Träger auf Deckung liegen oder nicht.

ψ_{II} für kleine Abstände erwartungsgemäß negativ, mit zunehmenden Abständen zu positiven Werten wachsend. Annäherung an den Grenzwert $1,0$ sehr langsam, so daß noch in einer Entfernung gleich dem achtfachen Gurtabstand erhebliche Abschirmung zu beobachten ist. Zur Erklärung dieser Erscheinung wird noch einmal auf die Abschnitte II, 2 und 3 verwiesen, im besonderen auf Bild 2b. Wie man erwarten mußte und Bild 3 u. 4 sofort entnimmt, ist ψ_{II} wesentlich abhängig von drei Größen:

- Völligkeitsgrad,
- Trägerabstand,
- Lage der Träger zueinander (auf Deckung oder versetzt).

Um diese Abhängigkeiten übersichtlicher zum Ausdruck zu bringen, sind in Bild 5a bis e die gemessenen Abschirmungswerte über dem Völligkeitsgrad φ aufgetragen mit dem Trägerabstand e/d als Parameter. Dabei wurde, um den unmittelbaren Anschluß an Gl. (2c) und (4) zu ermöglichen, nicht mehr ψ_{II} , sondern das Abschirmungsverhältnis η als Ordinate benutzt, das ja nichts anderes als die auf ψ_1 bezogene

Abschirmungszahl ψ_{II} ist ($\eta = \frac{\psi_{II}}{\psi_1}$). Hierbei macht es sich nun allerdings

unangenehm bemerkbar, daß ψ_1 nicht für alle Trägerpaare gemessen ist. Wir haben diese Unannehmlichkeit umgangen, indem wir in allen Fällen, in denen ψ_1 nicht aus Messungen bekannt war, den sicher guten Näherungswert $\psi_1 = 0,9$ benutzt haben. Die entsprechenden Punkte sind in Bild 5 durch eine Fahne (\wedge) gekennzeichnet. Die e/d -Werte haben wir in diesen Bildern, soweit es sich um Träger auf Deckung handelt, auf $e/d = 1,0, 2,0, 4,0$ und $6,0$ beschränkt. Für versetzte Träger ist η in Abhängigkeit von φ sogar nur für $e/d = 1,0$ aufgetragen. Da der Fall versetzter Träger fast nur bei Gittermasten und -türmen vorkommt und die Querschnitte dieser Raumfachwerke fast durchweg quadratisch sind, also die Bedingung $e/d = 1,0$ sehr angenähert erfüllen, darf die Beschränkung auf $e/d = 1,0$ als gerechtfertigt gelten. Im übrigen kann eine Auftragung der η -Werte für andere Werte e/d jederzeit auf Grund von Bild 5 erfolgen.

Aus Bild 5 ist folgendes abzulesen: Ein Einfluß des Fachwerktyps besteht; er ist aber so schwach, daß man ihn vernachlässigen kann. Ein

merklicher Einfluß der Stabprofile ist nicht festzustellen. Trägerumriß und Seitenverhältnis spielen keine entscheidende Rolle, solange der Völligkeitsgrad nicht groß, im besonderen nicht $\varphi = 1$ ist. Diese Beobachtungen befinden sich in Übereinstimmung mit den aus der Aerodynamik der Einzelträger (1. Teil) bekannten Tatsachen. Von erheblichem Einfluß ist, worauf wir schon hinwiesen, der Völligkeitsgrad. Auch das entspricht dem Verhalten des Einzelträgers. Nur besteht ein wesentlicher Unterschied insofern, als beim Einzelträger der Völligkeitsgrad der einzige praktisch wirksame Parameter ist; beim Trägerpaar treten neben ihm, also als nicht vernachlässigbar, Trägerabstand und Lage der Träger

zueinander. Wie ein Blick auf Bild 5 lehrt, überwiegt der Einfluß des Völligkeitsgrades.

Die Berechnung der resultierenden Windkraft W_g eines quer angeströmten Trägerpaares hat hiernach unter Berücksichtigung von Völligkeitsgrad, Trägerabstand und Lage der Träger zueinander zu erfolgen⁹⁾. Gemäß der Definition der resultierenden Widerstandszahl C_{w_r} ist

$$W_g = C_{w_r} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot F_r \text{ [kg]}$$

($F_r =$ Ansichtsfläche eines Trägers!). Für C_{w_r} läßt sich nach Gl. (4) schreiben

$$C_{w_r} = \psi_1 \cdot c_{w_r}^{(e=\infty)} (1 + \eta).$$

ψ_1 und η können Bild 3 u. 4 oder entsprechenden Meßergebnissen entnommen werden. Beide Größen sind abhängig von φ , e/d und gegenseitiger Trägerlage. Die Abschirmungszahl ψ_1 ist aber, wie wir gesehen haben, gegen Änderung der drei Zustandsgrößen so wenig empfindlich, daß es für technische Zwecke genügt, $\psi_1 \approx \text{const}$ zu setzen. Wir haben die Wahl zwischen $\psi_1 = 0,90$ und $\psi_1 = 1,0$. Wir entscheiden uns für

$$(5) \quad \psi_1 = 1,0 = \text{const},$$

da wir mit diesem Wert auf der sicheren Seite bleiben und den Rechnungsgang vereinfachen⁷⁾. $\psi_1 = \text{const}$ bedeutet: Wir vernachlässigen in erster Näherung die Wirkung des rückwärtigen auf den vorderen Träger.

⁹⁾ Das im Nachstehenden geschilderte Berechnungsverfahren ist bereits in einer früheren, unveröffentlichten Arbeit des erstgenannten Verfassers enthalten („Windbelastung stählerner Brücken. Vorarbeiten für den Entwurf neuer Berechnungsvorschriften auf Grund ausgeführter Versuche“). Es handelt sich um eine Darstellung, die im Februar 1934 für die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft und den Deutschen Stahlbau-Verband verfaßt wurde.

⁷⁾ Bei der Ermittlung der η -Werte für Trägerpaare, deren ψ_1 nicht gemessen war, haben wir oben $\psi_1 = 0,9$ gesetzt. Dazu sei bemerkt: Läßt man die Wahl zwischen $\psi_1 = 0,9$ und $\psi_1 = 1,0$ zu, so liefert $\psi_1 = 0,90$ für η den größeren Wert, dagegen $\psi_1 = 1,0$ für C_{w_r} den größeren Wert. Wir haben also über die zur Wahl gestellten ψ_1 -Werte in jedem der beiden Fälle so verfügt, daß das Ergebnis nach der sicheren Seite neigt

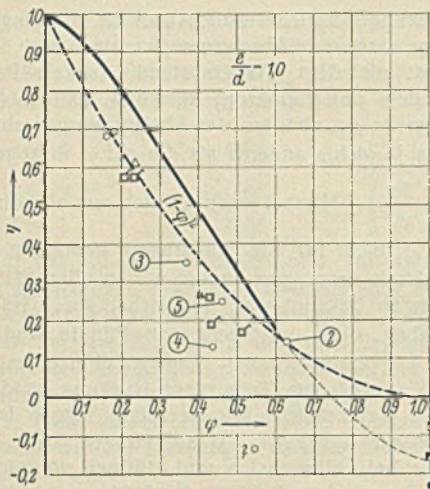


Bild 5a.

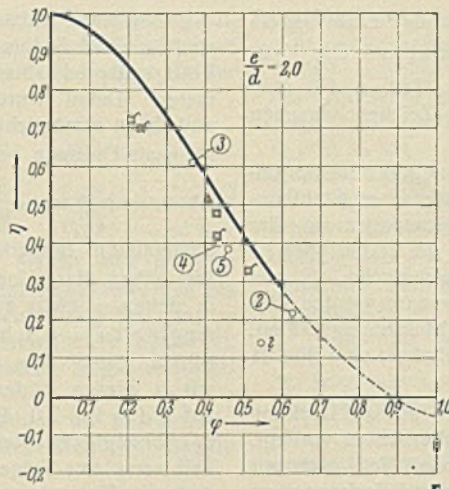


Bild 5b.

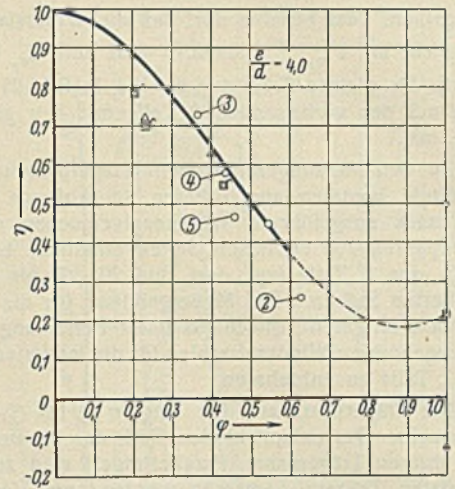


Bild 5c.

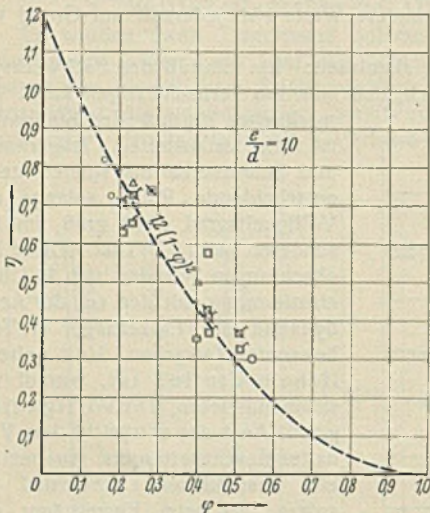


Bild 5e.

Bild 5a bis e.
Abschirmungsverhältnis η von Trägerpaaren
in Abhängigkeit vom Völligkeitsgrad φ der Träger.

Bild 5a bis d. Träger auf Deckung.

Bild 5e. Träger versetzt.
Kennzeichnung der Meßpunkte für $\varphi = 1,0$ wie
in Bild 1 und für $\varphi < 1,0$ in Übereinstimmung
mit Bild 3. Um aber in Bild 5e die den Bildern 3f
und 3g zugeordneten Meßpunkte voneinander zu
unterscheiden, wurden die dem Bild 3g ent-
sprechenden Meßpunkte mit einem Diagonal-
strich (\) versehen. Weitere Erklärungen im Text.

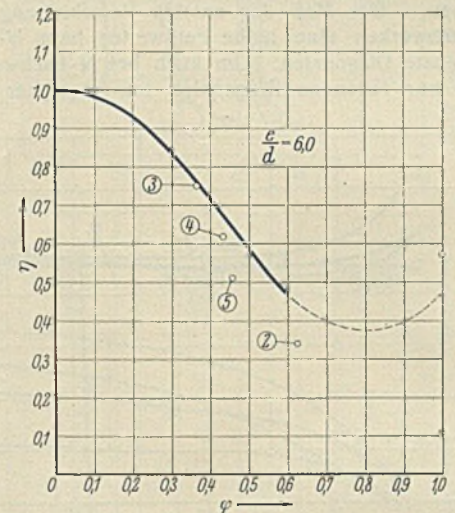


Bild 5d.

Die $\eta(\varphi, e/d)$ -Diagramme wird man für technische Winddruckberechnungen zweckmäßig noch umgestalten, etwa in folgender Weise: Eine Schar $\eta(\varphi)$ für gegebenes e/d hat so mäßige Streuung, daß man den physikalischen Zusammenhang durch eine Funktion $\eta(\varphi)$ annähern kann. Praktisch heißt das, daß man durch die Schar der Meßpunkte eine mittlere Kurve legt. Der erstgenannte Verfasser hat früher auf Grund einiger Versuche die Näherungsformeln

$$\left. \begin{aligned} \eta &= (1 - \varphi)^2 \text{ für Träger auf Deckung} \\ \eta &= 1,2(1 - \varphi)^2 \text{ für gegeneinander versetzte Träger} \end{aligned} \right\} \text{ bei } e/d = 1$$

angegeben⁸⁾. Die Kurven sind in Bild 5a u. e gestrichelt eingetragen; sie passen sich dem gemessenen Verlauf einigermaßen an, sind daher für Abschätzungen brauchbar. Ihre Erweiterung auf die Verhältnisse bei größeren e/d -Werten (Werte $e/d < 1$ bleiben hier außer Betracht) ist möglich, aber nur unter Verzicht auf die Einfachheit, die solchen Näherungsformeln allein ihre Existenzberechtigung verleiht. Man wird sich daher zeichnerisch helfen. In Bild 5a bis d ist das für auf Deckung liegende Träger geschehen (ausgezogene Kurven mit dünn gestrichelter Fortsetzung); das Resultat ist in Bild 6a zusammengestellt. Allerdings handelt es sich hier nicht mehr um Mittelkurven, sondern um Randkurven, die jeweils am oberen Rand der Meßpunktscharen entlanglaufen. Die Wahl oberer Randkurven findet ihre Begründung unmittelbar in unserer Absicht, Grundlagen für ein technisches Berechnungsverfahren zu schaffen: der Berechnung müssen η -Werte zugrunde gelegt werden, die jedenfalls nicht oder doch nicht wesentlich zu klein sind⁹⁾. Die gezeichneten η -Kurven müßten sich etwa oberhalb $\varphi = 0,6$ verzweigen,

⁸⁾ O. Flachsbart, Winddruck auf vollwandige Bauwerke und Gitterfachwerke (Verhandlungen d. Intern. Vereinig. f. Brückenbau u. Hochbau, Bd. 1, S. 153 ff., Zürich 1932). — Die Belastung von Bauwerken durch Windkräfte (Beitrag z. Lehrb. d. angew. Hydromechanik von W. Kaufmann, 2. Bd., Berlin 1934).

⁹⁾ Daß die η -Kurve für $e/d = 1$ (Bild 5a) etwas hoch liegt, hängt damit zusammen, daß wir bei der Festlegung der Kurven die noch unveröffentlichten Versuchsergebnisse von Herrn Dickmann (vgl. Abschnitt III) mit berücksichtigt haben.

da bei großen Völligkeitsgraden das Seitenverhältnis eine Rolle spielt. Wir haben auf die genaue Verfolgung dieser Zusammenhänge verzichtet und zum Zeichen hierfür die Kurven im Bereich $0,6 \leq \varphi \leq 1,0$ ohne Verzweigungen dünn gestrichelt, da Völligkeitsgrade $0,6 < \varphi < 1,0$ praktisch kaum vorkommen. Für $\varphi = 1$ sind die Verhältnisse einigermaßen bekannt. Wir haben die aus Bild 1 abzulesenden η -Werte eingetragen, indem wir für die vollwandige Platte $d = h$ setzten.

Für technische Zwecke wird es sich empfehlen, die Änderung von η oberhalb $\varphi = 0,6$ unberücksichtigt zu lassen, also zu setzen

$$0,6 \leq \varphi \leq 1,0 \quad \eta = \eta|_{\varphi=0,6} = \text{const.}$$

Dann ergibt sich ein letzter Schritt zur Vereinfachung von selbst: der Ersatz der Kurvenschar Bild 6a durch eine Schar nach Art der

Bild 6a.

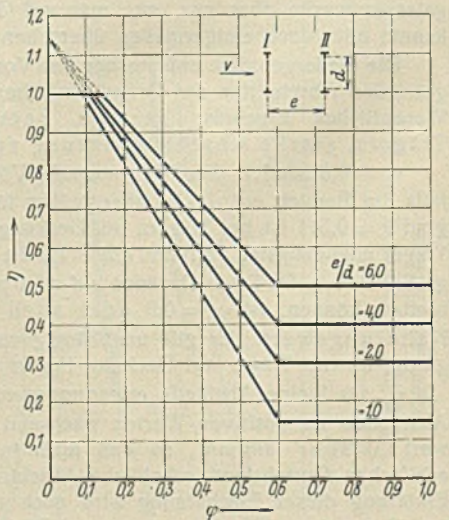
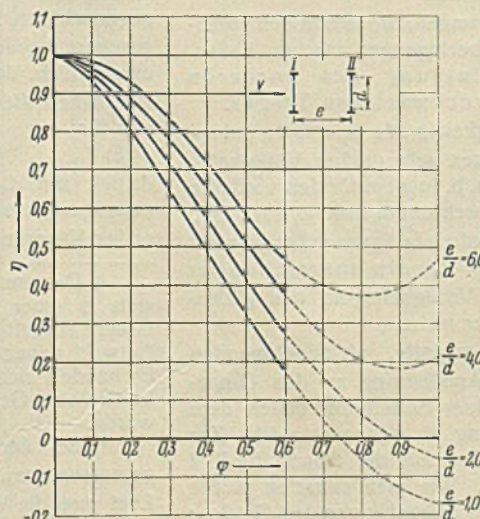


Bild 6b.

Bild 6a u. b. Schaubilder der η -Werte für die technische Windkraftberechnung von Trägerpaaren, deren Träger auf Deckung liegen. Entwickelt auf Grund der Bilder 5a bis d. Die abgelesenen η -Werte sind in Gl. (7) einzusetzen.

in Bild 6b gezeichneten, die in folgender Weise stückweise linear aufgebaut ist:

$$(6) \begin{cases} 0 \leq \varphi < 0,1 \dots & \eta = 1,0 = \text{const} \\ 0,6 \leq \varphi \leq 1,0 & \eta = \eta_{\varphi=0,6} = \text{const} \\ \text{dazwischen eine einparametrische Geradenschar} \\ \eta \approx 1,15 [1,0 - 1,45 \varphi (e/d)^{3/4}]. \end{cases}$$

In entsprechender Weise kann man für versetzte Träger verfahren. Man beachte, daß man es praktisch fast ausschließlich mit Gitterträgern von Volligkeitsgraden $0,1 < \varphi < 0,6$ zu tun hat.

Die Windkraftberechnung für ein quer angeströmtes Trägerpaar ist hiermit auf ein sehr einfaches Verfahren reduziert. Es besteht in der Anwendung von Gl. (4), die sich unter Benutzung von Gl. (5) vereinfacht zu

$$C_{w_r} = c_{w_r}^{(e=\infty)} (1 + \eta)$$

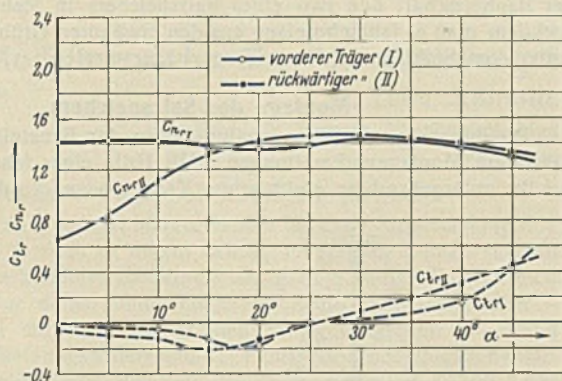


Bild 7 a.

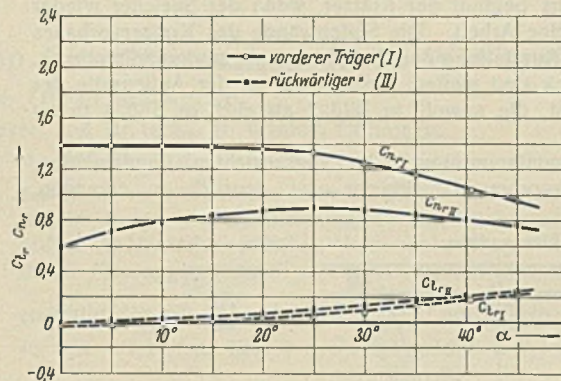


Bild 7 b.

Bild 7 a u. b. Trägerpaar aus zwei Trägern vom Typ ⑤, $\varphi = 0,458$. Schräganströmung von oben (Bild 7 a, vgl. hierzu auch die Definitionsskizze in Bild 8) und von der Seite (Bild 7 b). Trägerabstand $e/d = 4,12$ (hierbei $d =$ mittlere Entfernung zwischen den Mittellinien der Gurte eines Trägers). Nach AVA III.

oder, indem wir jetzt statt $c_{w_r}^{(e=\infty)}$ wieder kurz c_{w_r} schreiben, zu

$$(7) \quad C_{w_r} = c_{w_r} (1 + \eta).$$

Hierin ist c_{w_r} den Versuchsergebnissen für den Einzelträger zu entnehmen (1. Teil), näherungsweise darf gesetzt werden

$$\left. \begin{aligned} c_{w_r} &= 1,8 \text{ für } \varphi < 0,25 \\ c_{w_r} &= 1,6 \text{ für } \varphi \geq 0,25 \end{aligned} \right\} \text{ (vgl. 1. Teil).}$$

η kann Bild 5 u. 6 oder ähnlichen Diagrammen entnommen werden. Für Träger auf Deckung und

$$0,1 \leq \varphi \leq 0,6 \text{ genügt } \eta = 1,15 [1,0 - 1,45 (e/d)^{3/4}].$$

Wir werden im folgenden — nach einigen Bemerkungen über das Verhalten eines Trägerpaares bei Schräganblasung — prüfen, in welcher Weise sich aus der Windkraftberechnung für Trägerpaare ein Verfahren zur Windkraftberechnung für Brücken, Maste und Türme entwickeln läßt.

5. Versuche an zwei parallel hintereinander liegenden kongruenten Trägern bei Schräganströmung. Träger auf Deckung.

Ein Trägerpaar aus zwei Brückenträgermodellen vom Typ ⑤ des 1. Teils mit $e/d = 4,12$ wurde bei Schräganströmung von oben und von der Seite untersucht (Versuche des Deutschen Stahlbau-Verbandes 1921). Die Ergebnisse sind in Bild 7 a u. b aufgetragen, und zwar unter Benutzung der Normalkraftzahl $c_{n_r I}$ und der Tangentialkraftzahl $c_{t_r I}$ für den vorderen Träger (I) bzw. der entsprechenden Zahlen $c_{n_r II}$ und $c_{t_r II}$ für den rückwärtigen Träger (II). Für Queranströmung ($\alpha = 0^\circ$) ist $c_{n_r} = c_{w_r}$.

Man findet wie beim Einzelträger, daß die Tangentialkräfte vernachlässigbar klein sind. Außerdem zeigt die c_{n_r} -Kurve für den vorderen Träger fast genau den gleichen Verlauf wie beim einzelnen Träger (man vergleiche Bild 7 des vorliegenden 2. Teils mit Bild 22 u. 23 des 1. Teils). Die Normalkraftzahlen des vorderen Trägers sind im Verbands nur etwas

kleiner als bei Abwesenheit des Trägers II (eine Folge der Abschirmung des rückwärtigen Trägers).

Die Normalkraft des zweiten Trägers wächst zunächst mit zunehmender Schräglage der Windrichtung. Für $\alpha = 25^\circ$ war bei der untersuchten Anordnung sowohl für seitliche wie für Schräganströmung von oben ein Maximum erreicht. Der Abfall jenseits des Maximums erfolgt langsam. Daß die $c_{n_r II}$ -Kurven qualitativ diesen Verlauf haben müssen, ist leicht einzusehen. Auch quantitative Aussagen lassen sich in gewissem Umfang im voraus machen, wenn man — wie hier — das Verhalten des einzelnen Trägers bei Schräganströmung kennt. Auf die Durchführung dieser Betrachtung sei hier aber verzichtet.

Es genügt, wenn wir uns anmerken, daß beim schräg vom Wind getroffenen Trägerpaar die Tangentialkräfte beider Träger in erster Näherung vernachlässigt werden können und bei nicht zu kleinen Trägerabständen der Verlauf der Normalkraft des vorderen Trägers nahezu unabhängig von der Anwesenheit des rückwärtigen Trägers ist. (Fortsetzung folgt.)

Alle Rechte vorbehalten.

Neuzeitliche Bauausführung eines Salzspeichers.

Von Gerstner, VDI, Erfurt.

In der Kali-Industrie werden zur Aufspeicherung der gewonnenen Kalisalze fast ausnahmslos Holzschuppen verwendet, welche, in früherer Zeit rein handwerksmäßig hergestellt, mit dem durch die Entwicklung der Kali-Industrie bedingten Anwachsen der Abmessungen zu ansehnlichen Ingenieurkonstruktionen wurden. Der Querschnitt dieser Speicher besteht aus den Stützmauern aus Beton oder Eisenbeton, welche den seitlichen Salzdruck aufnehmen und die Holzdachkonstruktion tragen, deren Form dem natürlichen Böschungswinkel des Salzes angepaßt wird.

Infolge der erforderlichen großen freien Stützweite war man natürlich bestrebt, Stahl für die Haupttragkonstruktion zu verwenden, besonders auch deshalb, weil die Einrichtungen für das Ein- und Ausbringen des Salzes ohne weiteres an der Stahlkonstruktion angebracht werden können. Wegen der durch den Feuchtigkeitsgehalt des Salzes möglichen Rostgefahr hatte man bisher Bedenken gegen die Ausführung in Stahl. Diese Gefahr läßt sich jedoch durch geeignete Maßnahmen ausschalten. Unter diesen Gesichtspunkten ist die nachstehend beschriebene Konstruktion eines vor wenigen Wochen für die Kali-Werke Aschersleben, Schachanlage Hattorf in Philippsthal-Werra, ausgeführten Salzspeichers entworfen worden.

Bild 1 zeigt einen Querschnitt durch den Speicher. Der Binder besteht aus den vollwandigen, unten eingespannten Seitenteilen, welche den Salzdruck aufnehmen, und einem leichten Fachwerkteil im First, welcher die Beschickungsanlage aufnimmt. Die Form der Dachbinder ist

durch die verlangte Schütthöhe und das Fassungsvermögen des Speichers bedingt. Als Beschickungseinrichtung dient eine Hängebahn, welche den Speicher in der Längsrichtung durchfährt. Unter ihr befindet sich gleichfalls, an den erwähnten Fachwerkbindern aufgehängt, eine Holzbalkendecke mit Schüttöffnungen, welche eine Kontrolle der Hängebahn usw. ermöglicht.

Zur Entnahme des Schüttgutes dient ein Förderband, welches in der Schuppenachse unter Flur in einem Bandkanal läuft; an dieses Band wird das Salz durch den Kratzer herangeschafft, welcher unten auf einer Schiene über dem Kanal läuft und unter der Holzbalkendecke seitlich geführt wird.

Um den Speicher bis an den hinteren Giebel vollschütten zu können, muß die Möglichkeit gegeben sein, den Kratzer aus dem Lagerraum herauszuschaffen; zu diesem Zweck ist am Giebel ein Anbau, der Kratzervorbau, angeordnet. Nachdem der Kratzer

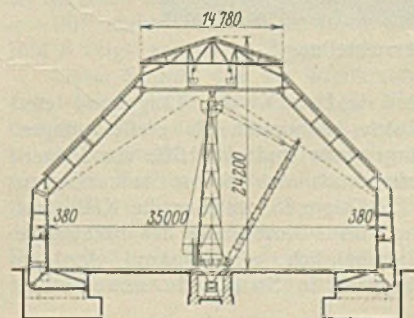


Bild 1. Querschnitt.

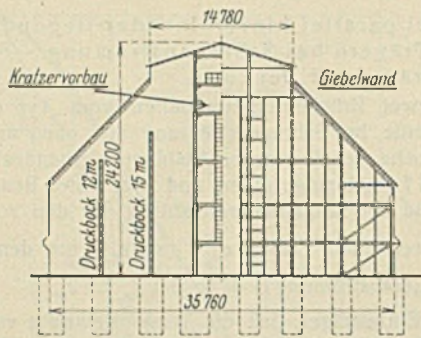


Bild 2. Giebelwand und Kratzervorbau.

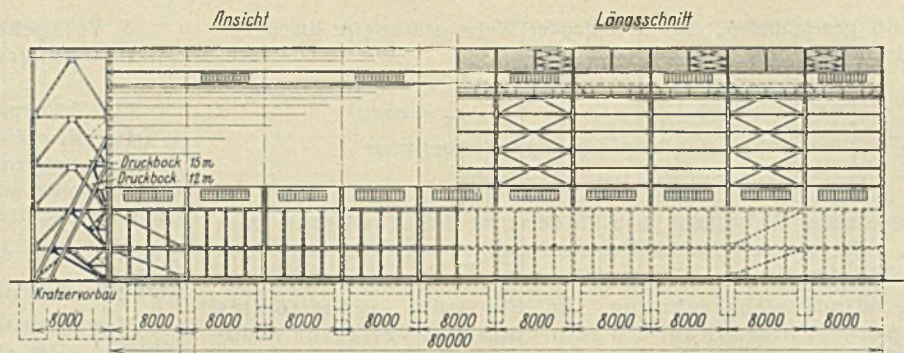


Bild 3. Längsansicht und Längsschnitt.

hier untergebracht ist, wird die Einfahrtöffnung durch Holzspanten verschlossen. Von hier aus beginnt der Kratzer, wenn der Speicher wieder geleert werden soll, seine Arbeit. Die Seitenwände des Kratzervorbaues dienen gleichzeitig zur Aussteifung der Giebelwand gegen den Seitendruck. Zu dem gleichen Zweck sind weitere Druckböcke an der Außenseite der Giebelwand angeordnet, die sowohl in Bild 2 als auch in Bild 3 zu erkennen sind.

Bild 3 zeigt die Gesamtanordnung in der Längsansicht mit Fundamenten. Auch sind hier Kratzervorbau, Druckböcke usw. deutlich zu erkennen.

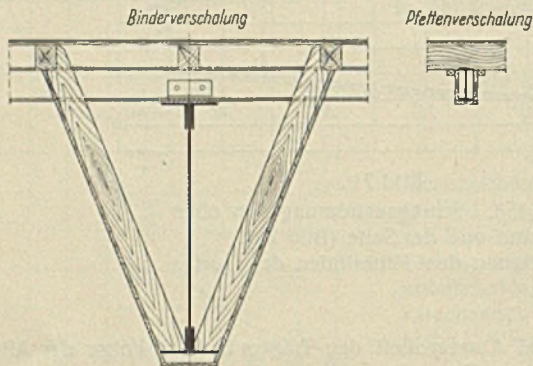


Bild 4. Binder- und Pfefterverschalung.

Um der eingangs erwähnten Rostgefahr zu begegnen, werden die Dachbinder nach besonderer Art durch eine Holzschalung verkleidet, die sich von der Längswand bis zum Dachaufbau raupenförmig auswirkt, wie in Bild 4 zu erkennen ist. In ähnlicher Weise sind die Dachpfeften geschützt.

Auf diese Art und Weise ist nach innen die gesamte Tragkonstruktion vollständig eingeschlossen und gegen jede Rostbildung geschützt. Die

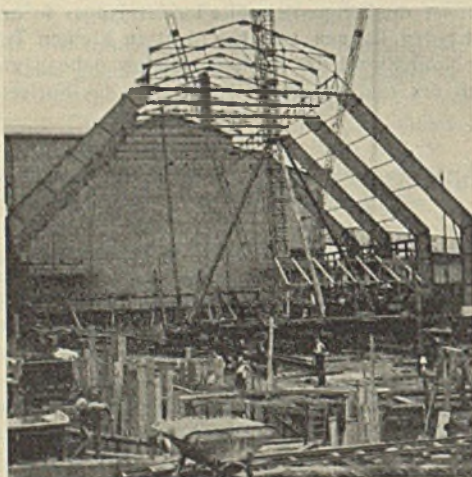


Bild 6. Binderaufstellung.

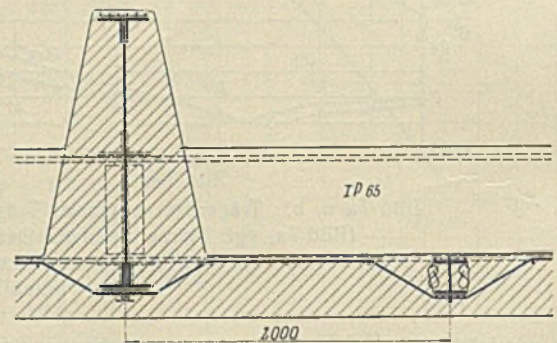
eingespannten Dachbinderstiele sind außerhalb der Längswand einbetoniert (Bild 5) und schmiegen sich harmonisch als Pfeilervorlagen der Dachhaut (Eternit) an. Die Längswände sind mit Hilfe von Peiner-Trägern konstruiert, die den Seitendruck des Salzes aufzunehmen haben. Als Hauptriegel dient ein IP-Träger 65, welcher die Kräfte auf den Dachbinderstiel überträgt. Durch diese Ausbildung der Fachwände sind die besonderen Stützmauern entbehrlich, ein Umstand, der den Entschluß zum Bau eines Salzschuppens in Stahl nicht unwesentlich beeinflussen dürfte.

Die Verkleidung der Fachwände ist ebenfalls in Bild 5 dargestellt.

Auf Grund der erwähnten Konstruktionseinzelheiten ist es gelungen, der Bauherrschaft den Bau eines Salzspeichers in Stahl zu ermöglichen, nachdem man es jahrzehntlang aus den erwähnten Gründen kaum gewagt hatte, dem Stahlbau in dieser Frage näherzutreten.

Montage des Salzspeichers.

Die beschränkten Platzverhältnisse an der Baustelle bedingten ganz besondere Montagevorbereitungen. Mit Hilfe einer fahrbaren Bühne und auf ihr untergebrachter elektrischer Kabelwinden wurden drei Schwenk-

Bild 5.
Ummantelung der Binderstiele und Wandausbildung.

maste bedient, welche die zusammengesetzten Dachbinder in die zuerst verlegten Binderfüße einführten (Bild 6).

Die verhältnismäßig schlechten Bodenverhältnisse gaben Veranlassung zu teilweise umfangreichen Abstützungen der Laufbahn für die Fahrbühne, da die Bauzeit außerordentlich kurz war. Nachdem einige Binderfelder ausgerichtet waren, wurde mit dem Verlegen der Dachhaut, dem Einschalen der Dachbinder und dem Betonieren der Längswände begonnen (Bild 7). Nur auf diese Weise war es möglich, trotz der beschränkten Platzverhältnisse den Schuppen der Bauherrschaft in kaum 12 Wochen fertig zu übergeben.



Bild 7. Stahlkonstruktion kurz vor beendeter Montage.

Die Firma Ernst Pfeffer, Stahlbau in Gispersleben-Erfurt, hat die obenerwähnte Stahlkonstruktion ohne jeden Unfall geliefert bzw. montiert. Die erwähnte Kratzerkonstruktion liefert die Firma Gebr. Kerner, Förderanlagen, Suhl (Thür.), während die umfangreichen Fundamentarbeiten und Ausmauerungen die Firma Wiegand in Philippsthal (Werra) ausführte.

INHALT: Modellversuche über die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkräfte. — Neuzeitliche Bauausführung eines Salzspeichers.

Für die Schriftleitung verantwortlich: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W8.
Druck der Buchdruckerei Oeßbäder Ernst, Berlin SW 68.