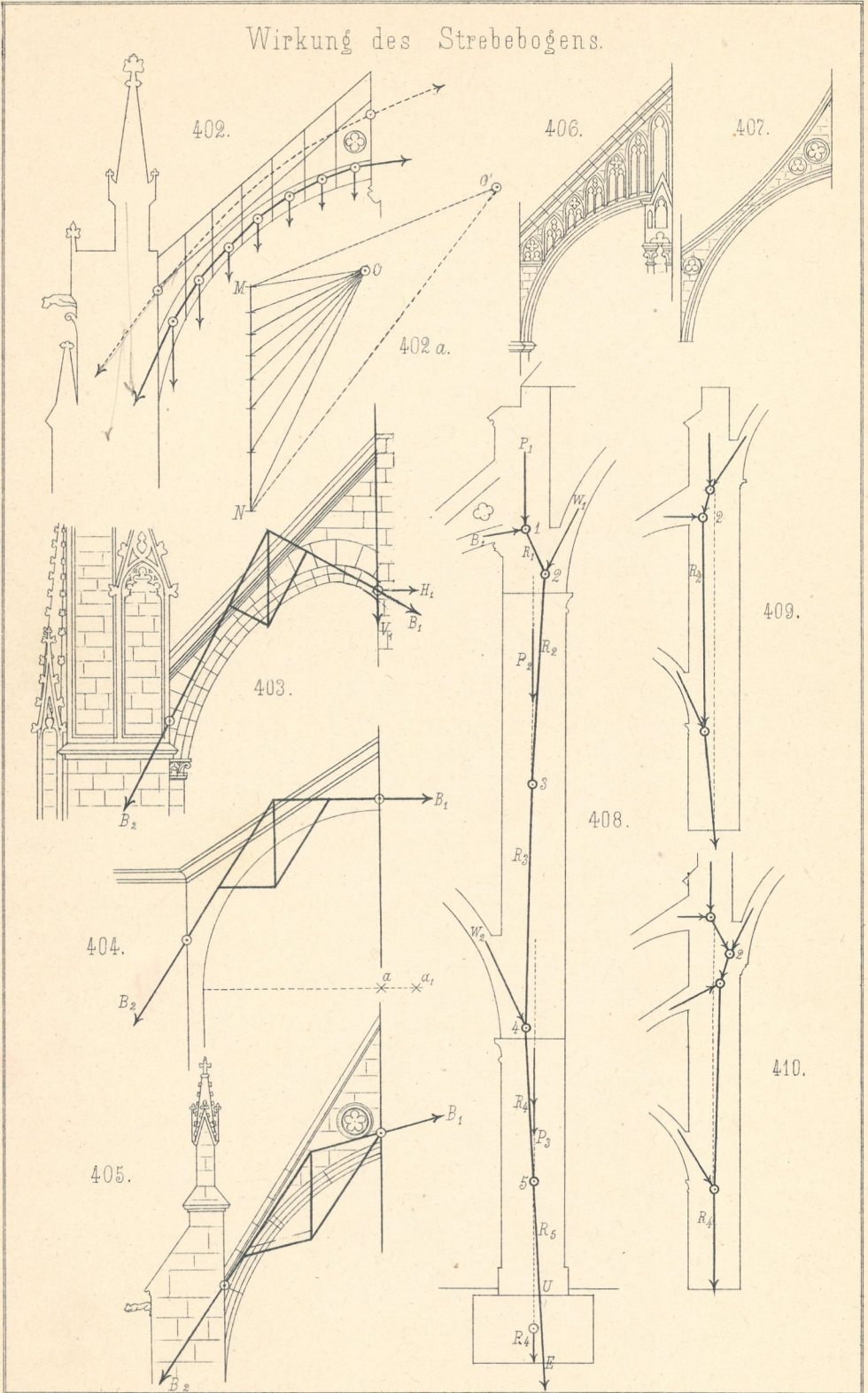


Wirkung des Strebebogens.



Mauer hinüberschiebt, bis im Punkte 2 die schräge Widerlagskraft W_1 des Mittelgewölbes hinzutritt. Da der Schub des Gewölbes grösser ist als der des Strebebogens, schiebt sich die Resultierende R_2 wieder nach aussen und setzt sich im Punkte 3 mit dem Gewichte P_2 des betreffenden Teiles der Mittelschiffwand zusammen zu der Kraft R_3 , die sich im Punkte 4 mit dem Wölbdruk W_2 vom Seitenschiff vereint. Jetzt ist es von Bedeutung, ob die Differenz der oberen Horizontalschübe vom Mittelschiffe und Strebebogen grösser ist als der Horizontalschub des Seitenschiffes oder kleiner. Wäre der oben verbliebene Restschub grösser, so würde sich die Resultierende R_4 nach aussen wenden, ist er aber, wie in der Figur angenommen, kleiner, so richtet sich R_4 wieder der Innenseite zu und setzt sich schliesslich mit dem Gewicht P_3 vom Pfeiler nebst Scheidebogen zu der Druckkraft R_5 zusammen, welche im Punkte U in das Fundament übertritt und nach Aufnahme vom Gewicht P_4 des Fundamentes schliesslich im Punkte E in den Erdboden übergeleitet wird.

Gerade im unteren Teile des Pfeilers, wo die Last am grössten geworden und die Masse am meisten beschränkt zu werden pflegt, ist eine möglichst zentrische Lage des Druckes erwünscht.

Welche Änderungen durch wechselnde Annahme des Strebebogens eintreten, mögen die Skizzen 409 und 410 erläutern. In 409 ist der Strebebogenschub etwa gleich dem Mittelschiffschube, infoigedessen geht die Kraft R_2 ungefähr senkrecht nach unten; in 410 ist der Schub vom Strebebogen und Seitenschiff zusammen so gross wie derjenige des Mittelschiffes, was dazu führt, dass unten die Resultierende R_4 senkrecht gerichtet ist. Ferner ist in 409 der Strebebogen weit herabgerückt, was die Folge hat, dass die Resultierende R_2 sich nach aussen schiebt, während umgekehrt der hochliegende Strebebogen in Fig. 408 und 410 den Schnittpunkt 2 gegen das Mittelschiffgewölbe hinüberdrängt.

Ebenso wie man durch Lage und Ausbildung des Strebebogens die Drucklinie hin- und herschieben kann, übt die Schwere der einzelnen Wandteile und das Überkragen derselben nach innen oder aussen, ferner das Gewicht und das Pfeilverhältnis der Gewölbe den grössten Einfluss aus. Es giebt so unerschöpflich viele Möglichkeiten, die Drucklinie zu lenken, dass selbst scheinbar sehr verwickelte Verhältnisse bei Hinzutreten von Emporen und Triforien und äusseren Umgängen sich bei richtigem Abwägen meist unschwer bewältigen lassen.

Infolge des elastischen Verhaltens des Mauerwerkes sucht sich der Druck schon von selbst einen möglichst günstigen Weg. Es genügt daher meist nachzuweisen, dass eine genügend günstige Druckübertragung zwanglos möglich ist. Ganz besonders kommt dabei in Frage, dass viele Drucklinien im Strebebogen möglich sind.

6. Dachlast und Winddruck.

Eigengewicht, Schneelast und Winddruck der Dächer.

Da die Dachlast infolge von Wind- und Schneedruck grossen Schwankungen ausgesetzt ist, da sie ausserdem bei Erneuerungen zeitweise fehlen kann, soll man sie nicht als eine „günstige“ Belastung in Rechnung stellen, man hat vielmehr zunächst die Festigkeit des Bauwerkes ohne Rücksicht auf Dachgewicht und Wind zu untersuchen und sodann beide hinzuzuziehen.

Das Eigengewicht des Daches setzt sich zusammen aus dem Gewicht der Binder, der Sparrenlage, der Lattung oder Schalung und der Deckung.

Eigen-
gewicht des
Daches.

Die Dachbinder ohne Sparrenlage, jedoch mit den zur Konstruktion gehörenden Dachbalken wiegen für jedes qm Dachfläche bei leichter Konstruktion 20—30 kg, bei schwereren Bindern 30—50 kg, das Gewicht eiserner Binder kann ebenso angenommen werden. Sind volle Fussbodenbeläge und bewegliche Lasten auf der Balkenlage zu erwarten, so sind diese besonders zu berücksichtigen.

Die Sparrenlage wiegt für jedes qm geneigter Dachfläche 14—20 kg, die Lattung 5—10 kg und eine Schalung aus 2 $\frac{1}{2}$ cm dicken Brettern 15—20 kg, eine solche aus 3 $\frac{1}{2}$ cm dicken Brettern 25—30 kg.

Für ein qm Deckungsmaterial (ohne Schalung oder Lattung) kann gerechnet werden:

für doppeltes Ziegeldach oder schweres Falzziegeldach 75—100 kg, im Mittel: 90 kg
 einfaches Ziegel-, Pfannen- oder leichtes Falzziegeldach 45—65 „ „ „ 60 „
 deutsches Schieferdach 45—60 „ „ „ 55 „
 englisches Schieferdach 30—45 „ „ „ 40 „
 Metalldeckung 8—16 „ „ „ 10 „

Das Gesamtgewicht von Dachkonstruktion und Deckung ist demnach:

Deckungsart:	für 1 qm Dachfläche			für 1 qm Grundrissfläche		
	von	bis	im Mittel	im Mittel 30°	bei einer Neigung von 45°	60°
doppeltes Ziegeldach	120	175	150	—	210	300
einfaches Ziegeldach	85	140	120	—	170	240
Schiefer, deutscher auf Schalung	95	160	125	—	175	250
Schiefer, engl. auf Latten	75	120	90	105	130	180
Metall	60	95	75	85	105	150

Schneelast.

Die Schneelast wird nach qm Grundrissfläche berechnet, und zwar nimmt man gewöhnlich 60 oder 75 kg auf 1 qm an. Auf steilen Dachflächen haftet der Schnee aber so selten, dass diese Annahmen einer Berichtigung dahin bedürfen, dass bei Dächern über 45° nur eine Last von 30 bis 50 kg auf ein qm Grundriss, bei Dächern von über 60° überhaupt keine Schneelast mehr in Rechnung zu setzen ist. Dagegen sollte man bei sehr flachen Dächern, besonders da, wo Schneeverwehungen zu erwarten sind, lieber um so mehr (vielleicht 90 oder 120 kg im nördlichen Deutschland) rechnen.

Unter Umständen ist es geboten, bei der Berechnung eines Satteldaches sowohl zweiseitige als einseitige Schneelast in Frage zu ziehen.

Winddruck
gegen
senkrechte
Flächen.

Den grössten Winddruck gegen eine senkrecht getroffene Fläche nimmt man in Deutschland gewöhnlich zu 125 kg auf 1 qm an. Diesen Druck würde man z. B. für senkrechte Wände, Giebel, Turmmauern für jedes qm in Rechnung zu setzen haben.

Für besonders ausgesetzte Stellen, Türme und Giebelwände sollte man zur Sicherheit diese Zahl erhöhen, vielleicht auf 150 oder gar 180 bzw. 200 kg. C. W. HASE warnt unter Hinweis auf bestimmte Fälle eindringlich vor einer zu niederen Annahme des Winddrucks. Besonders kann bei hochragenden Giebelwänden ein stossweis wirkender Wind Schwankungen hervorrufen, die zum Umsturz führen.

Der Druck gegen eine geneigte Dachfläche ist geringer. Der Wind, der gegen ein qm Dachfläche trifft (125 kg mal Sinus des Neigungswinkels) wird in eine Richtung senkrecht gegen das Dach und in eine Richtung parallel mit der Dachfläche zerlegt. Der letztere Anteil wird als unwirksam angesehen, was unbedenklich geschehen kann, soweit es sich nicht um flache und rauhe Dachdeckungen handelt, s. u. Der senkrecht zur Dachfläche gerichtete Druck, der allein in Frage kommt, hat die Grösse $125 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \alpha$, wenn α der Neigungswinkel des Daches ist. Man pflegt statt α einen Winkel $\alpha + 10^\circ$ in Rechnung zu stellen, da die Möglichkeit vorliegt, dass der Wind schräg von oben nach unten wirkt.

Das Dach muss stark genug konstruiert sein, diesen Winddruck aufzunehmen und auf die Auflager zu übertragen. Augenblicklich kümmert uns der Wind nur, soweit er die Auflager belastet, zu diesem Zwecke ist es wünschenswert, ihn nochmals in zwei Seitenkräfte zu zerlegen und zwar in eine lotrecht nach unten gekehrte Windlast und in einen horizontal gerichteten Windschub. Für verschiedene Neigungen sind diese Kräfte ausgerechnet und zu der nachstehenden Tabelle vereinigt.

Lotrechte Windlast und wagerechter Windschub eines Satteldaches für je 1 qm vom Winde getroffener schräger Dachfläche.

Neigung des Daches	Senkrechte Windlast						Wagerechter Windschub			
	auf beide Auflager zusammen		auf das Auflager an der				berechnet nach		berechnet nach der vollen senkrechten Projektion	
	$W \perp =$ $W_o \cdot \sin^2(\alpha + 10) \cos \alpha$ für $W_o =$		Windseite $A =$ $\frac{3}{4} W \perp - \frac{1}{4} W h \operatorname{tg} \alpha$ für $W_o =$	windfreien Seite $B =$ $\frac{1}{4} W \perp + \frac{1}{4} W h \operatorname{tg} \alpha$ für $W_o =$		$W h$ $W_o \cdot \sin^2(\alpha + 10) \cdot \sin \alpha$ für $W_o =$		$W_o \cdot \sin \alpha$ für $W_o =$		
	125 kg	200 kg	125 kg	200 kg	125 kg	200 kg	125 kg	200 kg	125 kg	200 kg
bis 10°	14	23	10	17	4	6	2,75	4	22	35
15°	22	35	16	26	6	9	6	9	32	52
20°	29	47	21	34	8	13	11	17	43	68
25°	37	60	26	42	11	18	17	28	53	85
30°	45	71	30	47	15	24	26	41	63	100
35°	51	82	32	51	19	31	36	57	72	115
40°	56	90	32	52	24	38	47	75	80	129
45°	59	95	29,5	47,5	29,5	47,5	59	95	88	141
50°	60	96	24	38	36	58	72	115	96	153
55°	59	94	14	23	45	71	84	134	102	164
60°	55	88	0	0	55	88	96	153	108	173
65°	49	79	-20	-31	69	110	106	169	113	181
70°	41	66	-48	-76	89	142	114	182	118	188
75°	32	51	-88	-141	120	192	120	192	121	193
80°	22	35	-158	-253	180	288	123	197	123	197
90°	—	—	—	—	—	—	125	200	125	200

W_o bezeichnet den Winddruck auf 1 qm senkrechte Fläche.

In den letzten 2 Spalten der Tabelle ist der horizontale Windschub angegeben, den man erhalten würde, wenn man den Wind gegen die volle senkrechte Projektion des Daches berechnet. Es entstehen dabei weit höhere Werte, als sie in den vorhergehenden Spalten aufgeführt sind. Der wahre Wert wird zwischen beiden liegen. Die niedrigen Werte stützen sich auf die Annahme, dass die Seitenkraft des Windes parallel zur Dachfläche vernachlässigt werden darf, was

für die flachen Dächer aber viel zu günstige Werte giebt. Für das Seitenschiffdach einer Basilika müssen die höheren Werte der letzteren Spalten benutzt werden, weil der etwa abgelenkte Wind am oberen Rande des Daches gegen die Mittelschiffwand treffen würde.

Die Verteilung des horizontalen Windschubes auf die Auflager lässt sich nicht allgemein angeben, da sie von der Eigenart der Konstruktion abhängt.

Bei Eisenkonstruktionen pflegt man das eine Auflager fest, das andere beweglich (mit Rollen u. dergl.) zu machen; in diesem Falle hat das feste Auflager bei beiden Windrichtungen den Schub allein zu übernehmen, während das bewegliche höchstens einen dem Reibungswiderstand entsprechenden Teil bekommen kann. Bei fest aufgelagerten Dächern kann man zur grösseren Sicherheit annehmen, dass der Windschub in ungünstiger Weise entweder allein dem linken oder dem rechten Auflager zufällt. Sonst wird man auch nicht zu weit irre gehen, wenn man bei gleichartig aufgelagerten mässig steilen Dächern den horizontalen Windschub etwa nach dem Verhältnis der „senkrechten“ Auflagerdrücke auf die beiden Seiten verteilt.

Bei der in der Tabelle angegebenen Verteilung der senkrechten Windlast auf die Auflager ist ein Satteldach vorausgesetzt; wenn dasselbe flach ist, überwiegt der Druck auf das Auflager an der Windseite, bei 45° bekommen beide Auflager gleichen Anteil, sodann erhält das abgekehrte mehr, bis bei über 60° Neigung das an der Windseite liegende Auflager sogar gehoben wird und durch das Gewicht des Daches oder eine Verankerung am Hochkippen verhindert werden muss.

Bei Pultdächern bekommen beide Auflager gleichen senkrechten Druck, wenn das höhere Ende direkt oben am First aufliegt. Ist dagegen das obere Ende durch vermittelnde Konstruktionen so gestützt, dass beide Auflager unten in gleicher Höhe liegen, so wird schon bei 45° Dachneigung das dem Winde zugekehrte Auflager keinen senkrechten Winddruck mehr erhalten, bei grösserer Neigung aber sich unter dem Winddruck ein Umsturmmoment bilden, dem das Dachgewicht ein Stabilitätsmoment entgegenzusetzen hat.

Beispiel: Das Mittelschiff einer Basilika von 12 m Breite und 7 m Jochlänge ist mit einem Schiefdach von 50° Neigung bedeckt. Es sollen die Lasten bzw. Schübe des Daches auf den Schiffspfeiler mit und ohne Wind bestimmt werden.

Für gewöhnlich trägt jeder Pfeiler nur das Eigengewicht des Daches über einer Jochhälfte, dasselbe hat bei 9,4 m schräger Länge einen Flächeninhalt von $9,4 \cdot 7 = \text{rd. } 66 \text{ qm}$. Das Gewicht von Dachwerk und Deckung sei für jedes qm Dachfläche 125 kg (vergl. S. 168), es wird dann das auf einem Pfeiler ruhende Eigengewicht betragen: $66 \cdot 125 = 8250 \text{ kg}$.

Wird eine Schneelast von 30 kg auf 1 qm Grundriss hinzugerechnet, so würde diese dem Pfeiler noch $7 \cdot 6 \cdot 30 = 1260 \text{ kg}$ Druck zuführen.

Der Wind bewirkt für jedes qm getroffener Dachfläche (hier 66 qm) einen senkrechten Auflagerdruck von 24 bzw. 36 kg (vergl. Tabelle), es erhält also der Pfeiler an der Windseite $66 \cdot 24 = 1584 \text{ kg}$ und der Pfeiler an der windfreien Seite $66 \cdot 36 = 2376 \text{ kg}$. Die grösste Dachlast mit Schnee und starkem Wind (die übrigens kaum zugleich auftreten können) würde für den dem Winde abgekehrten Mittelschiffpfeiler somit auf $8250 + 1260 + 2376 = 11886 \text{ kg}$ wachsen können, während der Pfeiler an der Windseite $8250 + 1260 + 1584 = 11094 \text{ kg}$ erhalten könnte.

Bedeutungsvoller pflegt der horizontale Windschub zu sein, er beträgt in diesem Falle nach der Tabelle: $66 \cdot 72 = 4752 \text{ kg}$. Selbst wenn man annehmen kann, dass dieser Schub sich ziemlich gleichmässig verteilt, also nur mit etwa 2400 kg für eine Seite gerechnet zu werden braucht, ist er in dieser Höhe nicht belanglos und verdient bei der statischen Untersuchung der Pfeiler Beachtung, wenn nicht, wie nachher gezeigt wird, dafür Sorge getragen ist, dass er dem Strebesystem zugeführt wird.

Handelt es sich um den Winddruck gegen das Dach einer Hallenkirche oder einschiffigen Kirche, so wird an der Windseite durch den Windschub der Gewölbeschub teilweise ausgeglichen, also die Widerlagswand entlastet, an der dem Winde abgekehrten Seite aber addiert sich der Windschub des Daches zu dem Wölbschube und ist daher für grosse steile Dächer bei der Bestimmung der Strebe-
pfeiler bzw. Wandstärke mit in Rücksicht zu ziehen, was keine Schwierigkeit bietet.

Wenn die Mittelpfeiler einer Hallenkirche oder zweischiffigen Kirche die Dachlast nicht mittragen, so werden sie auch vom Windschube weniger berührt. Ruht aber ein Teil des Daches auf dem Mittelpfeiler, so hängt es ganz von der Art der Konstruktion ab, wie stark dieser an der Aufnahme von Wind und Dachlast teilnimmt. Zeigt sich bei den statischen Untersuchungen (nach Massgabe der früheren Beispiele S. 160 und S. 162), dass der Mittelpfeiler dem bald von rechts, bald von links kommenden Windschube ohne unerwünschte Stärkezunahme nicht standhalten kann, so ist es sehr empfehlenswert, oben in der Querrichtung über den Gurten von der einen zur anderen Aussenwand eine Versteifung aufzumauern, welche den Windschub auf die Aussenwände übertragen kann.

Druck des Windes gegen die Wände der Basilika.

Sehr gewaltig gestaltet sich der Winddruck gegen hoch hinaufragende Wandflächen. Bei einschiffigen oder Hallenkirchen pflegen die Aussenwände nebst ihren Strebe-
pfeilern so stark zu sein, dass die vom Winde getroffene Seite den Druck in sich selbst aufnehmen kann. Nur bei sehr grosser Höhenentwicklung wird man darauf Bedacht zu nehmen haben, dass sich der Winddruck über dem Gewölbe zum Teil auf die andere Aussenwand übertragen und dem Wölbschube zugesellen kann.

Bei den Mittelwänden der Basilika aber, die auf möglichst dünne Pfeiler Winddruck
und
Wölbschub. zu stützen sind, gehört die Bewältigung des Winddruckes zu den wesentlichsten Fragen, sie kann, wie wir nachweisen wollen, selbst wichtiger werden als diejenige des Wölbschubes; es ist auffallend, dass man die Bedeutung des Strebesystemes für die Windbewegungen bisher so wenig beachtet hat.

Die Mittelwand der grossen Kathedralen ragt 15 bis 20 m und mehr über das Seitenschiff hinaus. Bei 7 m Jochbreite und 20 m freier Höhe würde sie z. B. dem Winde 140qm Fläche in jedem Felde bieten, welche $140 \cdot 120 = \text{rd. } 17000 \text{ kg}$ Druck erhalten würde, abgesehen von dem Windschube des Seitendaches, der vielleicht auch noch 2000 kg auf die Mittelwand abgibt und dem Schube des Mitteldaches, der bei 5000 bis 8000 kg Grösse einen mehr oder weniger grossen Anteil auf die getroffene Wand leitet. Es wird daher jedes Jochfeld einer derartigen Basilika 20 000 bis 25 000 kg Windschub erhalten, beim Dom zu Köln rechnet sich sogar noch ein grösserer Wert heraus. Nun wird aber ein Mittelschiffgewölbe von 7 m Jochlänge und 10 bis 14 m Spannweite, also 35—50 qm halber Grundfläche bei Kappen, die ein Stein stark aus Ziegel oder in gleicher Schwere aus natürlichen Steinen gewölbt sind nach Tabelle I (S. 139) nur einen Schub von 7500 bis 11000 kg auf jede Wand ausüben. Das Gewölbe muss demnach schon recht schwer sein, wenn es einen Schub liefern soll, der dem grössten zu erwartenden Windschub gleichkommt.

Zur Bewältigung des Windschubes sind zwei Möglichkeiten, entweder reicht die Stabilität der getroffenen Mittelwand bzw. deren Pfeiler aus, den Schub aufzunehmen, oder es muss der Windschub ganz oder teilweise in oder über dem Gewölbe auf die andere Wand und deren Strebesystem übertragen werden.

Der erste Fall, die Aufnahme des Windes durch die getroffene Wand selbst, wird bei Basiliken ohne Strebebogen statthaben müssen, da eine Überleitung auf die andere Mauer hier den Wölbschub mehren würde, dessen Bekämpfung ohnedies bei unverstrebten Basiliken schon grosse Schwierigkeiten macht. Die abgewandte Mauer wird schon genügend mehr beansprucht, wenn sie den ihr zufallenden Teil vom Windschube des Daches sicher aufnehmen soll.

Trägt bei einer mittelgrossen nicht verstreuten Basilika jeder Mittelpfeiler 300 000 kg senkrechte Last und berechnet sich der ganze Winddruck gegen die Mittelwand nebst Dach auf 10 000 kg mit einer durchschnittlichen Angriffshöhe von 16 m über Pfeilerbasis, so würde dieser Winddruck die Lage der Stützlinie unten im Pfeiler merklich nach innen rücken und zwar um ein Stück x , das sich sehr einfach berechnet aus der Momentengleichung:

$$300\,000 \cdot x = 10\,000 \cdot 16,00, \text{ also } x = 0,53 \text{ m.}$$

Es würde demnach durch den Wind ein Hin- und Herschwanke des Druckes unten um 53 cm zu erwarten sein. Sollen sich diese Schwankungen gerade innerhalb der Kerngrenze bewegen, so muss der Pfeiler für gewöhnlich, d. h. ohne Wind, den Druck in der Aussenkante des Kernes aufnehmen und eine Stärke haben, die bei rechteckigem Grundrisse $3 \cdot 0,53 = 1,59$ m, bei rundem Grundriss $4 \cdot 0,53 = 2,12$ m beträgt.

Dabei würden die Kantenpressungen doppelt so gross wie die Durchschnittspressung werden. Bei weniger festem Material würde man mit Rücksicht auf die Kantenpressungen unter Umständen diese Stärken noch zu vergrössern haben, während man bei sehr festem Material ein Überschreiten des Kernes in kleinen Grenzen zulassen könnte. (Ohne Winddruck würde bei Ausbalanzierung der Massen der Druck sich durch die Pfeilermitte leiten lassen und somit die Pressung in niederen Grenzen bleiben, also die Pfeilerstärke entsprechend kleiner ausführbar sein.)

Man ersieht, dass bei mässig hohen Basiliken mit wenig hochgezogenem Mittelschiffe allenfalls die Aufnahme des Windes durch die „getroffene“ Wand noch möglich ist; als man aber im 12. und 13. Jahrhundert die Höhenverhältnisse bedeutend steigerte, ohne die lastende Mauermaße zu vermehren, ja letztere noch möglichst zu verringern suchte, da konnte die Mittelwand dieser Aufgabe nicht mehr genügen, es hätte sonst infolge der Windschwankungen eine riesenhafte Steigerung der unteren Pfeilerdicke erfolgen müssen, die man aber vor allem zu verringern suchte.

Würde z. B. eine hohe Basilika mit einer Pfeilerbelastung von 300 000 kg einen Windschub von 20 000 kg erhalten, der bei der grossen Höhe im Durchschnitt 25 m über Fussboden zur Wirkung käme, so würde der Wind einen Ausschlag in der Drucklinie $x = 20\,000 \cdot 25,00 : 300\,000 = 1,67$ m geben. So dick pflegte man bei einer derartigen Basilika aber den ganzen Pfeiler nur zu machen. Aus diesem Beispiel, dem nur mittelschlanke Verhältnisse zu Grunde liegen, geht hervor, dass der Mittelpfeiler einer hohen Basilika nur einen sehr geringen Teil des Winddruckes übernehmen kann, dass der überwiegende Teil in oder über dem Gewölbe auf die andere Seite zu lenken ist und hier in geeigneter Weise abgefangen werden muss. Da hier die Mittelwand aber noch viel weniger solche Schwankungen in sich aufnehmen kann, wird das Vorlegen der Strebebogen eine Notwendigkeit. Es möge hier die Behauptung aufgestellt sein, dass die Einführung der Strebebogen mindestens ebensosehr durch den Windschub, wie

Winddruck
bei der Basi-
lika ohne
Strebebogen.

Winddruck
bei der Basi-
lika mit
Strebebogen.

durch den Wölbschub veranlasst ist. Erst unter diesem Gesichtspunkte versteht man die Konstruktionen der Alten voll und ganz, erst unter ihm erkennt man z. B. den Zweck doppelt übereinander gesetzter Strebebogen; von denen der obere häufig viel höher angreift, als es der Wölbschub verlangt.

VIOLLET-LE-DUC hat die grosse Bedeutung des Winddruckes übersehen, während ADLER in Berlin, wie ich nachträglich erfahren und auf eine Anfrage von ihm bestätigt erhalten habe, in seinen Vorträgen auf dieselben hingewiesen hat.

Um den Einfluss des Windes zu veranschaulichen, ist in Fig. 411 (Querschnitt des Strassburger Münsters) die Lage der Drucklinien mit und ohne Winddruck eingezeichnet, erstere punktiert gestrichelt, letztere einfach gestrichelt. Der Vorgang bei Einwirkung des Windes von links ist folgender: 1. das Dach übt auf beide Mauern einen nach rechts gerichteten Schub aus, 2. in der vom Winde getroffenen linken Mittelwand und deren Pfeiler schiebt sich die Drucklinie etwas nach rechts, 3. die linke Mittelwand lehnt sich dabei etwas nach rechts über, 4. infolge des Überlehrens der Mittelwand entlastet sich der linksseitige Strebebogen etwas (krummere Drucklinie), 5. beim Überlehnen legt sich die linke Mittelwand gegen das Gewölbe des Mittelschiffes und versetzt dieses in grössere Querspannung, die sich in flacheren Drucklinien durch den Gurt und durch die oberen Teile der Kappen überträgt, 6. durch die grössere Pressung des Gewölbes wird die rechte Mittelwand etwas nach rechts übergeneigt, dabei schiebt sich zugleich in ihr und in dem Pfeiler unter ihr die Drucklinie etwas nach rechts, 7. die rechtsseitigen Strebebogen bekommen durch das Gegenlehnen der Wand grössere Spannung, welche straffere Drucklinien erzeugt, 8. in dem äusseren Strebepfeiler rechts schiebt sich wegen des grösseren Strebebogenschubes die Drucklinie nach rechts.

Man muss sich das ganze System als beweglich denken; trotz der Starrheit der Stoffe sind kleine elastische Bewegungen, wenn sie auch nur nach Millimetern messen, vorhanden, die in entsprechenden Grenzen dem Gefüge des Mauerwerkes keinen Schaden zufügen. Die schwächeren Teile werden sich zuerst etwas fort-schieben, die stärkeren werden sich weniger bewegen; haben sich ein starker und ein schwacher Konstruktionsteil unter ähnlichen Verhältnissen in dieselbe Arbeit zu teilen, so wird demnach der stärkere auch den grösseren Anteil an der Leistung auf sich nehmen.

Würde z. B. der Mittelpfeiler unten sehr dünn oder gar auf ein Kugelgelenk gestellt sein, so würde die Mittelwand pendeln, beim geringsten Übermass von Schub von rechts oder links würde sie sich gegen das Gewölbe oder den Strebebogen lehnen und hier den ganzen Schub abgeben, ohne etwas nach unten zu tragen. Würde umgekehrt der Mittelpfeiler sehr kräftig, die obere Verstrebung aber sehr schwach sein oder gar fehlen, so würde der Pfeiler an der Windseite den grösseren bzw. ganzen Schub auf den Boden übertragen. Man hat es demnach in weiten Grenzen durch schickliche Einrichtung der Konstruktion in der Hand, entweder mehr die Mittelpfeiler oder andererseits die äusseren Strebepfeiler mit ihrem ganzen System der Querverstrebung zur Übertragung der Schübe heranzuziehen.

Den Mittelpfeiler wollte man aber so dünn wie möglich machen, daher durfte man ihm möglichst nur senkrechte, zentrale Druckkräfte mässiger Grösse zuführen,

dagegen musste man die Schübe, besonders aber „wechselnde“ Seitenschwankungen ihm möglichst fernhalten, für diese trat ein „um so festeres Strebesystem“ ein.

Die Festigkeit des Strebesystems ist aber weniger durch eine Häufung der Massen, als durch deren richtige Verteilung zu erzielen. Schon bei den Strebebogen ist vorhin darauf hingewiesen, dass ihre Steifigkeit durch eine entsprechende Gestaltung erzielt werden kann, dass sie im übrigen aber ziemlich leicht sein können.

Windüber-
tragung
durch die
Gewölbe.

Ein wichtiges Glied in der Kette der Querversteifungen bildet das Mittelschiffgewölbe, dem die Aufgabe zufällt, wechselnde Schübe zu übertragen. Es lohnt, das Gewölbe auf Grund dieser seiner Funktion kurz zu betrachten. Damit das Gewölbe eine grössere Schubübertragung, oder was dasselbe sagt, eine grössere seitliche Einspannung aufnehmen kann, müssen sich in ihm flachere Drucklinien als gewöhnlich bilden können, andernfalls wird es unter der grösseren Pressung im Scheitel gehoben und eventuell zerstört werden, es würde aus diesem Grunde ein leichtes Tonnengewölbe zur Querversteifung wenig geeignet sein, während ein ebenso leichtes Kreuzgewölbe dieselbe durch die Eigenart seiner Form zu leisten vermag.

Ein Gewölbe kann sich überhaupt nur im Gleichgewicht halten, wenn die äusseren Kräfte, welche es von den Seiten her einspannen, genau so gross sind wie die Schubkräfte, welche das Gewölbe nach aussen abgibt, wie ja überhaupt nur ein Ruhezustand denkbar ist, wenn überall sich Kraft und Gegenkraft aufhebt. Würde die einspannende Kraft zu gross, so würde sie das Gewölbe in die Höhe drängen, würde sie zu klein, so würde sich das Gewölbe nach unten durchdrücken. Für gewöhnlich wird der Gewölbeschub aufgehoben durch die umgekehrt gerichteten Gegendrücke der Widerlager, die als einspannende Kräfte für das Gewölbe anzusehen sind. Tritt an der einen Seite ein Winddruck hinzu, so gesellt er sich zu dem Gegendruck des Widerlagers zu einem grösseren Gegendruck, dem sich unbedingt ein grösserer Schub des Gewölbes entgegenstellen muss, wenn das Gleichgewicht erhalten bleiben soll. Ein Gewölbe kann bei gleichbleibender Schwere aber nur einen grösseren Schub liefern, wenn sich flachere Drucklinien in ihm bilden können. Somit erzeugt der Winddruck im Gewölbe grösseren Schub und flachere Drucklinien. Dieser grössere Schub wirkt nun aber nicht allein an der Windseite, sondern auch an der dem Winde abgewandten Seite, wo er lediglich durch den Gegendruck der Widerlagskörper aufgehoben werden muss und zwar bei Strebebogen zum grössten Teil durch diese.

Im ungünstigsten Falle kann der Schub, den diese Strebebogen an der windfreien Seite bekommen, sich steigern bis zu der Summe aus gewöhnlichem Wölbschub, dem durch das Gewölbe übertragenen Winddruck gegen die Mittelwand und dem ganzen (durch das Dachwerk eventuell auch Gewölbe übertragenen) Winddruck gegen die Dachfläche. Gewöhnlich werden sie aber weniger beansprucht werden, da die Mittelpfeiler einen Teil der Leistung auf sich nehmen.

Wie gesagt, würde ein Tonnengewölbe zur Übertragung des Windschubes sich wenig eignen, da in ihm die Drucklinien nur wenig Spielraum haben, es müsste denn das Gewölbe sehr dick, hoch hintermauert und überdies so schwer und stark schiebend sein, dass der Winddruck dem Wölbschub gegenüber relativ klein sein würde. Ganz anders verhält es sich mit dem Kreuzgewölbe, selbst wenn seine Kappen sehr dünn sind, pflegt der Gurt einen höheren Querschnitt zu haben, in welchem flachere Drucklinien möglich sind; das ist aber nicht der einzige Weg, der Querschnitt eines Kreuzgewölbes in der Mittelachse ist horizontal oder bei überhöhten Gewölben immerhin ziemlich flach, in diesen oberen Teilen des Kreuzgewölbes können sich flachere Stützlinien bilden, hier ist eine Querverspannung, oder wenn man will, Querverspreizung möglich, wie sie durch die eingezeichneten Linien im Querschnitt 411 und im Grundriss 412 zu Tage treten. Was der Gurt mit

seiner Hintermauerung nicht leisten kann, muss der Wölbscheitel auf sich nehmen. Der im Wölbscheitel übertragene Wind kommt bei der abgekehrten Seite oben an der Mauer bei *cd* zum Angriff und sucht die Mauer auszubauchen, dem muss ihre Steifigkeit entgegenstehen, sie wirkt wie ein im Grundriss liegender, scheinbarer Bogen und überträgt den Druck auf die Stützpunkte *e* und *f*. Hier müssen die Strebebogen anfallen, um diesen Druck aufzunehmen. Damit löst sich das Rätsel, weshalb sehr viele Strebebogen dicht unter der Dachtraufe sitzen. Natürlich darf ein weit oben angreifender Strebebogen nicht zu schwer sein, damit er für gewöhnlich die Mauer nicht zu sehr nach innen drängt. Da es sich darum handelt, auch den tiefer wirkenden Wölbschub aufzunehmen, muss der Strebebogen mit einer hohen senkrechten Fläche gegenfallen (vgl. Fig. 403 und 405). Wird diese Fläche zu hoch und der Bogen zu unerwünscht schwer, so ist es besser, an seiner Stelle zwei anzuwenden, einen höheren, der vorwiegend zum Abfangen des schwankenden Windschubes dient, und einen tiefer liegenden, der den mehr stetigen Wölbschub aufnimmt.

Die Übertragung des Winddruckes im Wölbscheitel gemäss Abb. 412 beansprucht die abgekehrte Wand *ef* stark auf Durchbiegung, dieselbe darf daher über den Fenstern nicht zu dünn sein, man hat sie bei alten Beispielen oft in geschickter Weise durch aussen und innen über den Fenstern vorgekragte Bogen erbreitert und durch auflastende Wimperge widerlagsfähiger gemacht.

Diese Beanspruchung der Wand lässt sich ganz oder teilweise vermeiden, wenn man den Gurtbogen genügend steif macht und ihn dadurch an Stelle des Wölbscheitels zur Übertragung des Windschubes geeignet macht, wie es der Durchschnitt 413 in zwei Abarten links und rechts andeutet. Es muss sich nun in der „vom Winde getroffenen Wand“ der Druck auf die Punkte *a* und *b* übertragen, was hier leicht möglich ist, da sich diese Übertragung auf die ganze Höhe verteilt und ausserdem der Druck in der hier dem Wölbschub entgegengerichteten Richtung weniger schadet. Man würde durch die Gurtversteifung dem mittleren Teile des Gewölbes die Schwankungen mehr fern halten und ausserdem in der Gurtebene ein fest geschlossenes Strebesystem erhalten, das einen grossen Bogen gleich sich vom Erdboden links durch Strebepfeiler, Strebebogen und steifen Gurt hindurch bis zur Sohle des Strebepfeilers rechts hinüberspannt. Ob Gurtversteifungen in der durchbrochenen Art von Fig. 413 bei historischen Beispielen ausgeführt, ist in diesem Augenblick nicht bekannt, eine gute Zwickelausmauerung und Übermauerung der unteren Gurtschenkel verrichtet auch im kleinen dieselben Dienste. — Oft kann man beobachten, dass die Alten an richtiger Stelle Gurtübermauerungen angelegt hatten, welche die Neuzeit aus Unkenntnis beseitigt hat.

Nicht unerwähnt soll bleiben, dass auch die Dachbalken einen wesentlichen Anteil an der Übertragung des Windschubes und an der ganzen Querversteifung nehmen können und in vielen Fällen in der That nehmen. Mindestens sind sie geeignet, den ganzen Windschub des Daches, sobald die Wand an der Windseite sich nur minimal überneigt, auf die abgekehrte Wand und die dortigen Strebebogen zu tragen; das vermögen sie selbst dann, wenn sie gar nicht fest mit der Wand verbunden, sondern einfach aufgelagert sind (durch die Reibung an der Auflagerfläche).

Es ist zum Schlusse noch eine andere Wirkung des Windes auf die Mittelwand hervorzuheben. Eine hochhinausragende Wand wird in dem Stück zwischen Seitenschiff und Mittelschiffgewölbe auf Durchbiegung beansprucht in ganz ähnlicher Weise,

Versteifung
durch die
Gurtbogen.

Durchbiegung
der
Mittelwand.

wie ein senkrecht stehendes Brett unter einem seitlichen Druck auszubiegen sucht. Dabei entsteht an der Innenseite Zug, an der Aussenseite Druck. Fig. 414 I stellt die Verteilung der Spannungen in einem Querschnitt des Wandpfeilers schematisch dar.

Die Grösse der Spannungen berechnet sich durch Aufsuchen des Biegemomentes in ähnlicher Weise, wie bei einem belasteten Balken mit dem einzigen Unterschied, dass dieser wagerecht, der Wandpfeiler aber senkrecht steht. In diesem Falle würde der Fusspunkt des Pfeilers als der eine Auflagerpunkt und das obere Wandende am Gewölbe als der andere Auflagerpunkt anzusehen sein. Das grösste Biegemoment würde in einer gewissen Höhe oberhalb des Seitenschiffdaches zu erwarten sein, über die einfache Art seiner Aufsuchung soll nichts weiter hinzugefügt werden, es möge der Hinweis auf diese Windwirkung und die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen genügen.

Zu den in Fig. 414 I dargestellten Zug- und Druckspannungen des Querschnittes gesellt sich der durch die oberen Lasten hervorgerufene Wand- oder Pfeilerdruck D (414 II). Geht D gerade durch den Schwerpunkt des Querschnittes, so erzeugt er gleichmässig verteilte Druckspannungen. Die Spannungen von I und II addieren sich algebraisch, so dass die Gesamtbeanspruchung des Querschnittes durch Fig. 414 III gekennzeichnet wird. An der Aussenkante addieren sich die „Druckspannungen“ von I und II, an der Innenkante subtrahieren sich „Zug und Druck“. War hier der Zug grösser, so kann noch ein Überschuss von Zug verbleiben, wie es die Figur zeigt. Der letztere wird vermieden und die ganze Spannungsverteilung gleichmässiger, wenn der Druck D nicht in der Mitte, sondern etwas näher der Innenkante angreift, wie es durch die entsprechenden Spannungsbilder von Fig. 415 veranschaulicht wird.

Somit macht es der Winddruck gegen hochragende Mittelwände erwünscht, die Drucklinie in der oberen Wandhälfte mehr an der Innenkante zu halten, für den unteren Teil des Pfeilers ist es aber aus ähnlichen Gründen besser, den Druck von der Innenkante fern zu halten; es würde deshalb eine Druckführung etwa nach Art der Fig. 410 als günstig zu bezeichnen sein. Dieses kann nach den Ausführungen von Seite 167 aber erzielt werden durch einen nicht zu tief angreifenden und nicht zu stark schiebenden Strebebogen. Zwei übereinander befindliche Strebebogen können auch hier wieder um so besser wirken, sie werden überhaupt das obere Wandende sicherer führen, so dass es mehr die Eigenschaften eines fest eingespannten Balkenendes annimmt.

Auch diese durchbiegende Einwirkung des Windes auf die Mittelwände ist nicht zu unterschätzen, sie ist bei den grössten Kathedralen so bedeutend, dass die Querschnitte für die Wand bzw. die Wandpfeiler gerade richtig bemessen sind, um sie genügend sicher aufzunehmen. Dass der gewaltige Winddruck gegen die grossen Fensterflächen gleichfalls grosse Beachtung fordert und auch in der Konstruktionsweise gefunden hat, sei an dieser Stelle nur beiläufig erwähnt.

Wenn nicht der beschränkte Raum Einhalt geböte, würden wir gern den Einfluss des Windes auf das Strebesystem noch weiter verfolgen, um so mehr als ihm unseres Wissens an keiner anderen Stelle eine hinlängliche Beachtung geschenkt ist. Jedenfalls kann auch diese Betrachtung nur dazu dienen, die Hochschätzung vor den alten Meistern zu erhöhen; je mehr man in die Einzelheiten ihrer Konstruktionen eindringt, umso mehr lernt man sie bewundern. — Unsere jetzige Zeit hat auf dem Gebiete der Steinkonstruktion trotz aller unserer Theorien nichts hervorgebracht, das sich an Kühnheit des Gedankens und an Grossartigkeit der konstruktiven Auffassung auch nur annähernd mit jenen Werken der Alten zu messen vermöchte.