



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der gotischen Konstruktionen

Ungewitter, Georg Gottlob

Leipzig, 1890-

6. Dachlast und Winddruck

[urn:nbn:de:hbz:466:1-80225](#)

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 Ueberkragen 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.

Die Beweglichkeit und Freiheit der mittelalterlichen Konstruktionsweise tritt an keiner anderen Stelle gleich schlagend hervor.

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.

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

Die Dachbinder ohne Sparrenlage, jedoch mit den zur Konstruktion gehörenden Dachbalken wiegen für jeden qm Dachfläche bei leichter Konstruktion 20—30 kgr, bei schwereren Bindern 30—50 kgr, 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 jeden qm geneigter Dachfläche 10—15 kgr, die Lattung 5—10 kgr und eine Schalung aus $2\frac{1}{2}$ cm dicken Brettern 20 kgr, eine solche aus $3\frac{1}{2}$ cm dicken Brettern 30 kgr.

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

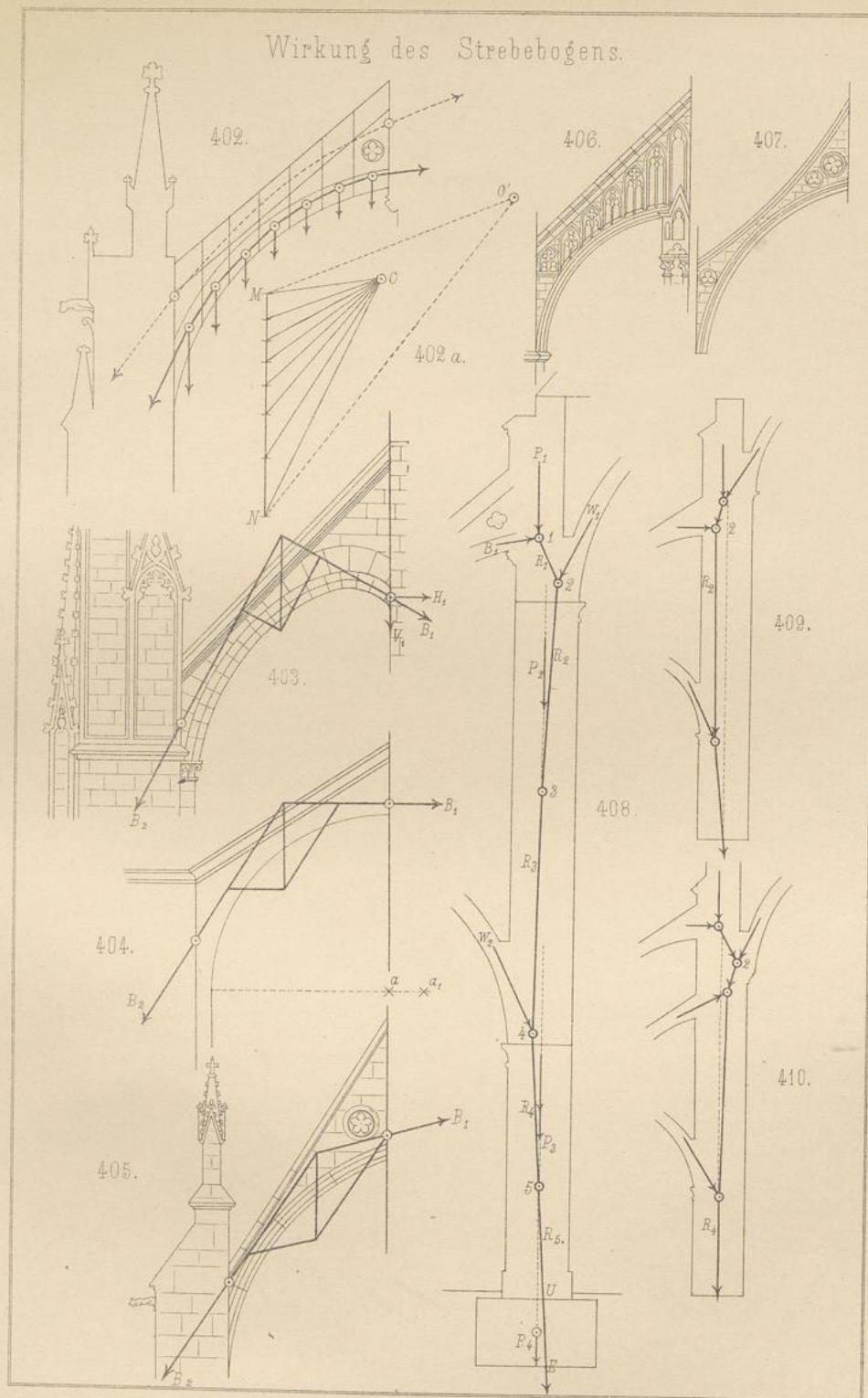
für doppeltes Ziegeldach	75—100	kgr, im Mittel: 90	kgr
einfaches Ziegel-, Pfannendach oder Falzziegeldach	45—65	„	60
Schieferdach	30—45	„	40
Metalldckung	8—16	„	10

Das Gesamtgewicht von Dachkonstruktion und Deckung ist demnach:

Deckungsart:	für 1 qm Dachfläche			für 1 qm Grundrissfläche im Mittel bei einer Neigung von		
	von	bis	im Mittel	30°	45°	60°
doppeltes Ziegeldach	120	175	140	—	200	280
einfaches Ziegeldach etc.	85	140	110	—	155	220
Schiefer	75	120	90	105	130	180
Metall	60	95	75	85	105	150

Tafel XLI.

Wirkung des Strebebogens.



Die Schneelast wird nach qm Grundrissfläche berechnet, und zwar nimmt Schneelast man gewöhnlich 60 oder 75 kgr 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 kgr auf den qm Grundriss, bei Dächern von nahezu oder 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 kgr im nördlichen Deutschland rechnen).

Den grössten Winddruck gegen eine senkrecht getroffene Fläche nimmt man in Deutschland gewöhnlich zu 120 kgr auf 1 qm an. Diesen Druck würde man z. B. für senkrechte Wände, Giebel, Turmmauern für jeden 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 kgr. 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 einen qm Dachfläche trifft (120 kgr 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. Der senkrecht zur Dachfläche gerichtete Druck, der allein in Frage kommt, hat die Grösse $120 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \alpha$, wenn α der Neigungswinkel des Daches ist. (Bei flachen Dächern pflegt man statt α einen Winkel $\alpha + 10^{\circ}$ in Rechnung zu stellen).

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

für je 1 qm vom Winde getroffener, schräger Dachfläche.

Neigung des Daches	Senkrechte Windlast			horizontaler Windschub auf beide Auflager zusammen
	auf beide Auflager zusammen	auf das Auflager an der Windseite	freien Seite	
bis 20°	28 kgr	20	8	10 kgr
30°	43	29	14	25
40°	54	31	23	45
45°	57	28,5	28,5	57
50°	58	23	35	69
55°	57	14	43	81
60°	53	0	53	92
70°	40	— 45	85	110
80°	21	— 152	173	118
90°	—	—	—	120

11*

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 Umsturzmoment bilden, dem das Dachgewicht ein Stabilitätsmoment entgegenzusetzen hat.

Beispiel: Das Mittelschiff einer Basilika von 12 m Breite und 7 m Jochlänge ist mit einem Schieferdach von 50° Neigung bedeckt. Es sollen die Lasten bez. 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, dieselbe 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 jeden qm Dachfläche 90 kgr (vergl. S. 162), es wird dann das auf einem Pfeiler ruhende Eigengewicht betragen: $66 \cdot 90 = 5940 \text{ kgr}$.

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

Der Wind bewirkt für jeden qm getroffener Dachfläche (hier 66 qm) einen senkrechten Auflagerdruck von 23 bez. 35 kgr (vergl. Tabelle), es erhält also der Pfeiler an der Windseite $66 \cdot 23 = \text{rd } 1520 \text{ kgr}$ und der Pfeiler an der windfreien Seite $66 \cdot 35 = 2310 \text{ kgr}$. Die grössste Dachlast mit Schnee und stärkstem Wind (die übrigens kaum zugleich auftreten können) würde für den dem Winde abgekehrten Mittelschiffspfeiler somit auf $5940 + 1260 + 2310 = 9510 \text{ kgr}$ wachsen können, während der Pfeiler an der Windseite $5940 + 1260 + 1520 = 8720 \text{ kgr}$ erhalten könnte.

Bedeutungsvoller pflegt der horizontale Windschub zu sein, er beträgt in diesem Falle nach der Tabelle: $69 \cdot 66 = 4554 \text{ kgr}$. Selbst wenn man annehmen kann, dass dieser Schub sich ziemlich gleichmässig verteilt, also nur mit etwa 2500 kgr für eine Seite gerechnet zu werden braucht, ist er in dieser Höhe nicht ganz belanglos und verdient bei der statischen Untersuchung der Pfeiler eine 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 Gewölbschub teilweise ausgeglichen, also die Widerlagswand entlastet, an der dem Winde abgekehrten Seite aber addiert sich der Windschub des Daches zu dem Wölbschub

und ist daher für grosse steile Dächer bei der Bestimmung der Strebepeiler bez. 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 Windschub nicht wesentlich berührt. Ruhet 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. 154 und S. 157), dass der Mittelpfeiler dem bald von rechts, bald von links kommenden Windschub ohne unerwünschte Stärkezunahme nicht Stand halten 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 Strebepeilern 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 Wölbshub zugesellen kann.

Bei den Mittelwänden der Basilika aber, die auf möglichst dünne Pfeiler ^{Winddruck} zu stützen sind, gehört die Bewältigung des Winddruckes zu den wesentlichsten ^{und} ^{Wölbshub.} Fragen, sie kann, wie wir nachweisen wollen, selbst wichtiger werden als diejenige des Wölbshubes, es ist auffallend, dass man die Bedeutung des Strebesystems 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 140 qm Fläche in jedem Felde bieten, welche $140 \cdot 120 = \text{rd } 17000 \text{ kgr}$ Druck erhalten würde, abgesehen von dem Windschube des Seitendaches, der vielleicht auch noch 2000 kgr auf die Mittelwand abgibt und dem Schube des Mitteldaches, der bei 5000 bis 8000 kgr 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 kgr Windschub erhalten, beim Dom zu Köln rechnet sich sogar noch ein grösserer Wert heraus. Nun wird aber ein Mittelschiffsgewölbe von 70 bis 100 qm Grundfläche (7 m Jochlänge und 10 bis 14 m Spannweite) bei Kappen, die ein Stein stark aus Ziegel oder in gleicher Schwere aus natürlichen Steinen gewölbt sind nach Tabelle 1 (S. 135) nur einen Schub von 15 000 bis 22 000 kgr 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 bez. 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,

Winddruck wird bei Basiliken ohne Strebebögen statthaben müssen, da eine Ueberleitung bei der Basilika ohne Strebebögen auf die andere Mauer hier den Wölschub mehren würde, dessen Bekämpfung ohne dies bei unverstreten 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 verstreten Basilika jeder Mittelpfeiler 300 000 kgr senkrechte Last und berechnet sich der ganze Winddruck gegen die Mittelwand nebst Dach auf 10 000 kgr 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 Herschwanken 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 Grundriss $3 \cdot 0,53 = 1,59$ m, bei rundem Grundriss $4 \cdot 0,53 = 2,12$ m beträgt.

Dabei würden die Kantenpressungen schon ziemlich bedeutend werden, so dass man bei weniger festem Material diese Stärken noch zu vergrössern hätte. (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 Mittelschiff allenfalls die Aufnahme des Windes durch die „getroffene“ Wand noch möglich ist; als man aber im XII. und XIII. Jahrhundert die Höhenverhältnisse bedeutend steigerte ohne die lastende Mauermasse zu vermehren, ja letztere noch thunlichst 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 Basilika mit einer Pfeilerbelastung von 300 000 kgr einen Windschub von 20 000 kgr 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 mittelschlank 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 Wand aber noch viel weniger solche Schwankungen in sich aufnehmen kann, wird das Vorlegen der Strebebögen eine Notwendigkeit. Es möge hier die Behauptung aufgestellt sein, dass die Einführung der Strebebögen mindestens ebenso sehr durch den Windschub, wie durch den Wölschub 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 Strebebögen, von denen der obere häufig viel höher angreift, als es der Wölschub verlangt.

Um den Einfluss des Windes zu veranschaulichen, ist in Fig. 411, (Querschnitt des Strassburger Münsters), die Lage der Drucklinien mit und ohne Winddruck

Winddruck
bei der Basili-
ka mit
Strebebögen.

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 Ueberlehnen der Mittelwand entlastet sich der linksseitige Strebebogen etwas (krumme Drucklinie). 5. Beim Ueberlehnern 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 Strebebögen 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 Uebermass 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 oder gar fehlend sein, so würde der Pfeiler den grösseren bez. 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 Uebertragung 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 Strebensystem“ ein.

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

Ein wichtiges Glied in der Kette der Querversteifungen bildet das Windübertragung durch die Gewölbe.

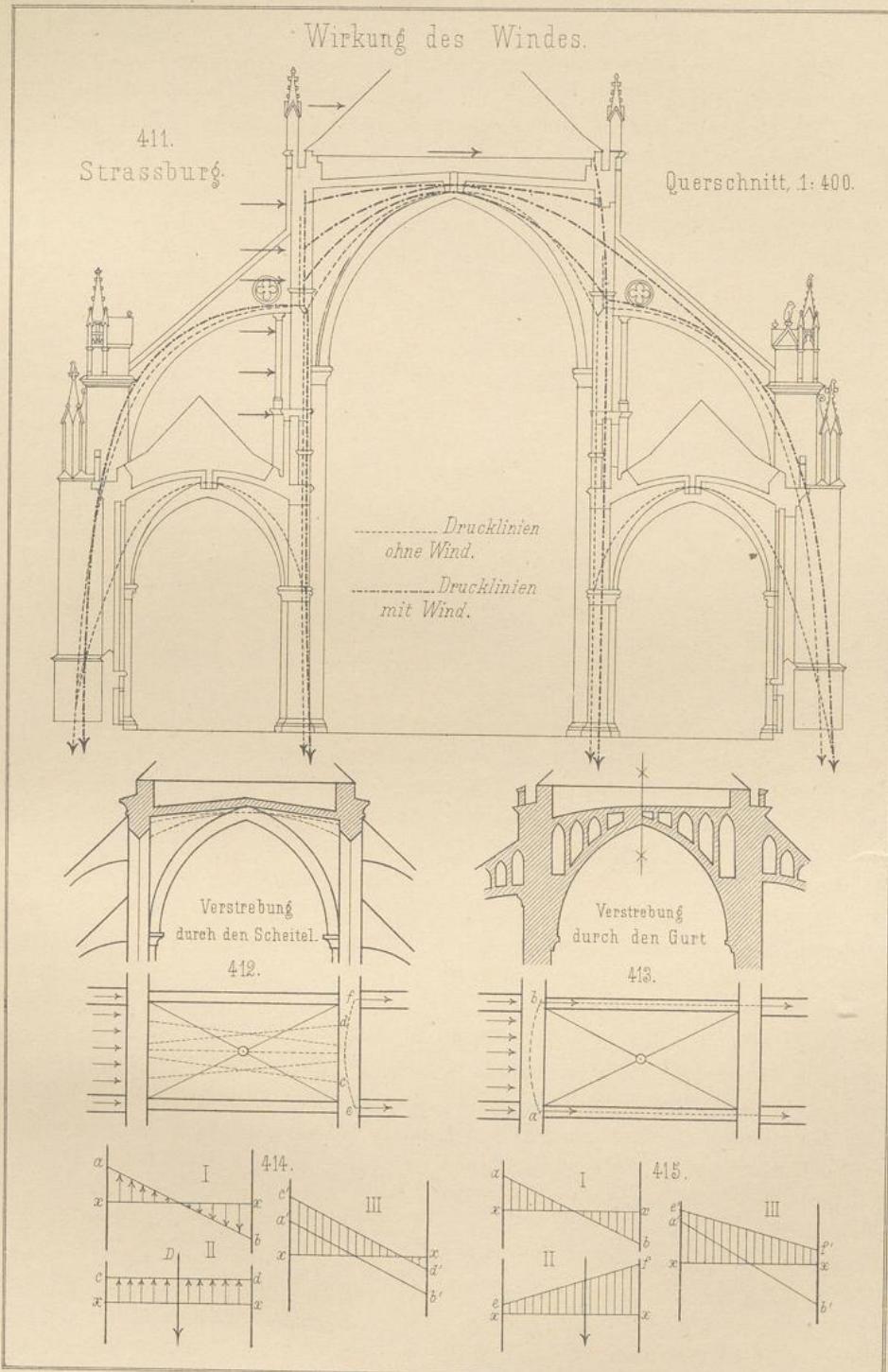
das Gewölbe eine grössere Schubübertragung, oder was dasselbe sagt, eine grössere seitliche Einspannung aufnehmen kann, müssen sich in ihm flachere Drucklinien als gewöhnlich bilden können, andernfalls wird es unter der grösseren Pressung im Scheitel gehoben und eventuell zerstört werden, es würde aus 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 Ruhestand 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 Wölbschub 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 Strebebögen zum grössten Teil durch diese.

Im ungünstigsten Falle kann der Schub, den diese Strebebögen 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 Uebertragung 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 eigenen 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 eingezzeichneten 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 *c d* zum Angriff und sucht die Mauer auszubauchen, dem muss ihre Steifigkeit entgegenstehen, sie wirkt wie ein im Grundriss liegender scheitrekrechter Bogen und überträgt den Druck auf die Stützpunkte *e* und *f*. Hier müssen die Strebebögen anfallen um diesen Druck aufzunehmen. Damit löst sich das Rätsel, weshalb sehr viele Strebebögen 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

Tafel XLII.



wirkenden Wölbshub 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 Wölbshub aufnimmt.

Die Uebertragung des Winddruckes im Wölscheitel 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 vorgekrigte Bögen erweitert und durch auflastende Wimperge widerlagsfähiger gemacht.

Diese Beanspruchung der Wand lässt sich ganz oder teilweis vermeiden, wenn man den Gurtbogen genügend steif macht und ihn dadurch an Stelle des Wölscheitels zur Uebertragung 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 Uebertragung auf die ganze Höhe verteilt und ausserdem der Druck in der hier dem Wölbshub entgegengesetzten Richtung weniger schadet. Man würde dadurch dem mittleren Teile des Gewölbes die Schwankungen mehr fern halten und ausserdem in der Gurtebene ein fest geschlossenes Strebessystem erhalten, das einem 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 Uebermauerung der unteren Gurtchenkel verrichtet auch im kleinen dieselben Dienste. — Oft kann man beobachten, dass die Alten an unrichtiger Stelle Gurtübermauerungen angelegt hatten, welche die Neuzeit aus Unkenntnis beseitigt hat.

Nicht uner wähnt soll bleiben, dass auch die Dachbalken einen wesentlichen Anteil an der Uebertragung 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 Strebebögen 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, 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 Biegungsmomentes 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 (als eingespannt zu betrachtende) Auflagerpunkt und das obere Wandende am Gewölbe als der andere Auflagerpunkt anzusehen sein. Das grösste Biegungsmoment würde in einer gewissen Höhe oberhalb des Seitenschiffdaches zu erwarten sein, über die einfache Art seiner Aufsuchung soll nichts

Versteifung
durch die
Gurtbögen.

Durchbie-
gung der
Mittelwand.

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 Ueberschuss 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 161 aber erzielt werden durch einen nicht zu tief angreifenden und nicht zu stark schiebenden Strebebogen. Zwei übereinander befindliche Strebebögen können auch hier wieder umso 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 bez. 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, umso 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 all 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.