



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der gotischen Konstruktionen

Ungewitter, Georg Gottlob

Leipzig, 1890-

1. Fenster im allgemeinen

[urn:nbn:de:hbz:466:1-76966](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-76966)

VII. Fenster und Masswerk.

1. Die Fenster im allgemeinen.

Entwicklung der Fenster.

Vor der allgemeinen Einführung der Verglasung war der Abschluss der Lichtöffnungen eine Frage, welche nicht nur die Ausbildung dieser Oeffnungen selbst, sondern die ganze Gestaltung des Bauwerkes einschneidend beeinflusste. Um für die Wohn- und Aufenthaltsräume grössere Lichtöffnungen zu schaffen, die geschützt gegen die Ungunst des Wetters und abgeschieden gegen den Lärm und Staub der Aussenwelt waren, sah man sich genötigt Vordächer oder Säulengänge den Räumen vorzulegen und diese möglichst gegen abgeschlossene Innenhöfe zu kehren. Dieses Oeffnen der Räume nach innen findet im Grundriss des antiken Hauses seinen sprechenden Ausdruck und wird in dem Kreuzgang der Klöster auf spätere Jahrhunderte übertragen, bei letzteren traten allerdings weitere Gründe für die Abscheidung von der Aussenwelt hinzu.

Nun liess sich aber nicht allen Fenstern eine derartig geschützte Lage anweisen, man musste sie oft genug in die Aussenwände legen, ganz besonders bei grossen weiträumigen Monumentalbauten. Handelte es sich um untergeordnete Licht- und Luftöffnungen, die vielleicht obendrein nach minder wichtigen Räumen führten, so liess man sie, wie noch heutigen Tags viele Turm- und Giebelfenster ganz ohne Abschluss, höchstens brachte man in besonderen Fällen Vergitterungen oder zeitweis zu schliessende Holzklappen vor ihnen an. Um das Hineinschlagen des Regens soviel wie möglich einzuschränken, machte man solche freie Oeffnungen relativ klein, da dann die grosse Mauerstärke schützend eingreift. Statt eines grossen Fensters stellte man mehrere kleine neben einander, die man unter Umständen durch einen gemeinsamen Bogen zusammenfasste, wodurch ihre Zusammengehörigkeit, ihr Eintreten für ein einziges grosses Fenster fassbar zum Ausdruck gelangt.

Die Fenster an den grossen Monumentalbauten, besonders den Kirchen ganz frei zu lassen, war selbst in den südlichen Ländern nicht immer geboten, ein zeitweiliges Schliessen durch Läden war aus künstlerischen und praktischen Gründen, besonders bei den hochliegenden Fenstern schwer ausführbar, man musste daher auf einen feststehenden, Licht einlassenden und doch thunlichst das Wetter abhaltenden Abschluss sinnen, den man zu byzantinischer Zeit in durchlöcherten, ausserdem oft reich gemeisselten Marmorplatten fand. (Ob und inwieweit dieselben teilweise schon eingesetzte Glasstücke aufwiesen, dürfte eine noch offene Frage sein.) Da diese Platten viel Licht verschluckten,

Geschützte
Lage der
Licht-
öffnungen.

Oeffnungen
ohne
Abschluss.

Uebergang
zur
Verglasung.

machte man die Fensteröffnungen nicht gar zu klein, erst später, als man im 10. bis 11. Jahrhundert sich mehr und mehr der damals noch sehr kostbaren Verglasung aus farbigen Gläsern in Bleifassung zuwandte, brachte man sie auf das äusserste Mindestmass, so dass man selbst ältere grössere Fenster bisweilen nachträglich verkleinert zu haben scheint.

In demselben Grade, wie sich dann die Herstellung des Glases vervollkommnete und verbilligte, konnten sich die Fensterflächen ausdehnen, umso mehr als Hand in Hand damit die Ausbildung des Stützsystemes die Wand mehr in die Stellung des einfachen Raumabschlusses verwies, den man unbeschadet der Haltbarkeit frei durchbrechen konnte. Man war somit bei eintretender Gotik in die Lage versetzt, die Glasfläche nach den jeweiligen praktischen oder künstlerischen Forderungen im grossartigsten Massstabe zu entfalten, was man um so lieber that, als die inzwischen immer glänzender entwickelte Glasmalerei ein zauberhaft wirkendes Mittel dekorativer Ausstattung herlich.

Verglasung der Fenster.

Die Grösse leicht herstellbarer ebener Glasstücke war eine beschränkte, sie ging nach jeder Richtung nicht weit über die Länge einer menschlichen Hand hinaus. Man musste die Stücke so neben einander fügen, dass die Fuge weder Luft noch Wasser in lästiger Weise durchliess und benutzte als geeignetes Verbindungsmittel bald das sehr schmiegsame Blei, das bis in den Beginn unseres Jahrhunderts hinein seine unbeschränkte Bedeutung für die Herrichtung von Fenstersprossen behauptet hat. Die Bleisprosse, wie sie Fig. 1129—1129b etwa in natürlicher Grösse im Querschnitt zeigt, hat einen Mittelsteg, genannt die „Seele“ und zwei Flanschen, deren Breite zwischen 3 und 7 mm zu liegen pflegt. Die Sprossen goss man in Formen, erst seit der Renaissancezeit kam der „Bleizug“ in Gebrauch, dessen Verwendung man am Eindruck der Zahnräder auf der Seele erkennt. Nach der auf den Werkstisch gehefteten Zeichnung werden die Glasstücke zugeschnitten und dann von einer Ecke fortschreitend in die Nuten der zwischengelegten Bleistränge geschoben, letztere, die sich leicht jeder Biegung anschmiegen, lässt man so weit als möglich aus einem Stück durchlaufen; wo sie gegen einander stossen, werden die Enden mit dem Messer gerade oder schräg zusammengeschnitten und beiderseits überlötet. Ist in dieser Weise eine Tafel von rechteckiger, quadratischer oder einer anderen, der Masswerkteilung entsprechenden Form zusammengestellt, so wird sie an ihrem Umriss durch einen gewöhnlichen oder nur einseitig ausgebildeten Bleistrang (Randblei) umzogen; obwohl sich diese Bleiumfassung der Tafeln nicht immer an den mittelalterlichen Werken findet, ist es gut, sie zu machen.

Die Breite der Tafeln lässt sich der nötigen Steifigkeit wegen nicht gut über 60 bis 100 cm steigern, gewöhnlich beträgt sie nur 50—75 cm, man ist bei solchen Tafeln ohnedies schon gezwungen, einzelne dünne runde (selten eckige) Eisen von 6—10 mm Durchmesser, sogenannte Windeisen überzulegen, die durch umgewickelte, auf die Bleisprossen gelötete Bleihafter befestigt werden. Man legt sie am besten nach der kürzesten Richtung der Tafel, lässt sie aber auch wohl, damit sie den freien Durchblick nicht stören, mit den Sprossen schräg oder selbst gekrümmt laufen. Die Enden der Eisen sind gewöhnlich platt geschlagen, damit sie das Einklemmen der Tafelränder ermöglichen. Bei Fenstern, die dem Winde besonders stark ausgesetzt sind, dürfen Windeisen von mehr als 60 cm Länge bei 20—30 cm Abstand nicht unter 1 cm dick sein, wenn sie ein Einbiegen oder selbst ein Eindringen der Tafel verlässlich verhüten sollen, besonders soll man bei wertvollen Glasmalereien kräftige und dichtliegende Windeisen

Grösse der
Glasstücke.

Verbindung
der Blei-
sprossen.

Tafelgrösse,
Windeisen.

verwenden und die Tafelbreite nicht wesentlich über 60 cm hinausgehen lassen. Für Fenster, die dem Winde wenig oder gar nicht ausgesetzt sind, fallen diese Bedenken fort, sie bedürfen nur einzelner dünner Eisen, welche die ebene Fläche der Tafel erhalten.

Ueber die Technik der Glasmalerei sei nur kurz eingeschaltet, dass man zu romanischer und frühgotischer Zeit nur eine einzige dunkelbraune Malfarbe, das Schwarzlot kannte, mit welcher die Umrisse, Blattrippen und dunkleren Gründe des Ornaments aufgetragen wurden, im Uebrigen musste jeder Farbton, selbst in einer kleinen Fläche als besonderes Glasstück eingesetzt werden. Grosse Flächen derselben Farbe, welche die Glasabmessungen überstiegen oder ihrer hakenförmigen Gestalt wegen nicht gut zugeschnitten werden konnten, wurden mit Hülfe von Teilblei (Notblei) aus mehreren Glasstücken zusammengesetzt. Im XIV. Jahrhundert trat eine neue Malfarbe, das Kunstgelb hinzu, ausserdem begann man das rote Glas, welches stets Ueberfangglas war, stellenweis hell auszuschleifen; später stellte man auch andere Farben als einerseits oder beiderseits überfangene Gläser her und am Ausgang des Mittelalters begann man nach einander alle Farben aufzumalen. Diese Umgestaltungen entsprangen anfangs aus der Umgehung zu vieler Notsprossen, später aus der geänderten Geschmacksrichtung; je weiter sich jedoch einerseits die Maltechnik vervollkommnete, um so mehr litt andererseits die architektonische Flächenwirkung Einbusse.

Neben den vielfarbigen Fenstern traten allein mit Schwarzlot in Schraffierungen gemalte Fenster (Grisaillen) unter zerstreuter Verwendung farbiger Glasstücke oder auch ohne solche auf. Schliesslich wurden in Verfolg strenger Ordensvorschriften (Zisterzienser) an Stelle der vielfarbigen Fenster auch solche aus farblosem Glase in Bleimusterung häufiger angewandt, von denen aber wenig erhalten ist.

Am höchsten in ihrer monumentalen Wirkung dürften wohl unbestreitbar die mosaikartig aus satten Tönen zusammengesetzten Fenster der früheren Zeit sein, die in ihren ornamentalen, architektonischen wie figurlichen Darstellungen stets ein einheitliches, der Fläche sich einordnendes, reiches aber ruhiges Gesamtbild liefern. (S. SCHÄFER und ROSSTÄUSCHER, ornamentale Glasmalereien.)

Nur bei Fenstern sehr geringer Grösse, kleinen Rundfenstern oder Masswerkteilen ist es möglich, die ganze Oeffnung mit einer einzigen, in oben beschriebener Art zusammengesetzten Glastafel zu schliessen, in der Regel erfordern die Fenster eine Aneinanderreihung mehrerer Tafeln. Sind die Tafeln allein der Höhe nach zusammengesetzt (Fig. 1130), so kann das Fenster nur ein Lichtmass von 70—90, höchstens 100 cm erhalten, ist dagegen eine Teilung auch in der Breite durchgeführt (Fig. 1131 und 1132), so lässt sich die Fensterweite auf etwa 150 cm steigern, damit sind für gewöhnlich die Grenzen erreicht. Liegt die Notwendigkeit vor, eine breitere Wand zu durchbrechen, so muss man mehrere solcher Fensterflächen neben einander verwenden, die entweder durch volle Mauerstücke oder doch wenigstens durch steinerne Pfosten von einander getrennt sind.

Grösse ver-
glaster
Fenster.

In der Zeit um 1200, als der Drang, weite Oeffnungen zu schaffen, stark hervortrat, das Masswerk aber seine Entwicklung erst begann, kommen Fenster von mehr als 1½ ja selbst mehr als 2 m vor (Reims etc.), die dann in ein ganzes Netz quadratischer Felder unter Verwendung kräftiger Eisenstangen zerlegt waren.

Es handelt sich nun darum, die einzelnen Glastafeln in dem Fenster zu befestigen. Da wo sie seitwärts an das Gewände oder den Mittelpfosten stossen, werden sie entweder in eine Nut geschoben (s. Fig. 1133), wobei die Tafel während des Einbringens nötigenfalls etwas gekrümmt wird, oder es wird die Glastafel vor einen Falz gelegt (Fig. 1134), der nur einer Breite von 1—1½ cm bedarf. Bei stark dem Winde ausgesetzten Fenstern pflegt man den Falz nach aussen zu legen, also das Fenster von aussen vorzubringen, so dass sich der Falzverstrich an der Aussenseite befindet und der Wind das Fenster gegen den Falzanschlag presst. Geschützt und dem Auge nahe gelegene Fenster werden aber auch recht oft von innen vorgelegt. Der Falz bez. die Nut wird mit Haarkalk, neuerdings meist mit Glaserkitt oder weniger gut mit Zement verstrichen.

Anschluss
der Vergla-
sung an
Laibung und
Pfosten.

Die Berührungslinie zweier benachbarter Tafeln bedurfte der Befestigung und Dichtung wegen besonderer Vorkehrungen. Es wurden hier starke Eisenschienen von 25—40 mm Breite und 8—15 und mehr mm Dicke, die den Namen Sturmstangen (Fig. 1135) führen, angebracht, sie greifen mit den Enden 4 bis 8 cm tief in die Gewände oder Pfosten ein und werden am besten gleich beim Mauern eingelegt und mit Blei fest eingegossen oder sonst so befestigt, dass sie sich nicht lockern können. Weniger gut ist das nachträgliche Einsetzen, das sich durch Einschieben eines Endes in ein stärker vertieftes Loch und nachträgliches teilweises Zurückziehen ermöglichen lässt.

Sturm-
stangen und
Deck-
schienen.

Die Sturmstangen müssen mit der einen Fläche bündig mit dem Anschlag des Falzes liegen, damit sich die Glastafel ringsherum gleichmässig anlegen kann. Um die Verglasung zu halten bez. anzupressen, trägt die Sturmstange auf ihrer Mittellinie in 20—30 cm Abstand vorspringende Lappen oder Krampen, *k* in Fig. 1135, durch welche nach Vorbringen der Tafel kleine Keile oder gekrümmte Splinte *s* in Fig. 1135 gesteckt werden. Statt die Splinte unmittelbar gegen das Randlei treten zu lassen, wird besser eine Deckschiene eingeschaltet (s. *d* in Fig. 1135). Sie hat gleiche Breite mit der Sturmstange bei einer Stärke von nur 3—5 mm und fasst mit schlitzartigen Öffnungen über die Krampen, durch Anziehen der Keile wird die Verglasung dicht zwischen Sturmstange und Deckschiene eingeklemmt. Krampen und Deckschiene sind naturgemäss nach derjenigen Seite gerichtet, von welcher die Glastafel vorgelegt wird, also gewöhnlich nach aussen.

Kommen bereits bei breiten Langfenstern (Fig. 1131 und 1132) Ueberkreuzungen von wagrechten und senkrechten Sturmstangen vor, so treten selbige noch mehr auf bei grossen Rund- oder Masswerkfenstern, es können sich dort Teilungen nach Art der Figuren 1136—1136 b ergeben. Bei den sog. Vielpassen pflegt meist eine Sturmstange kranzförmig durch die Enden der Nasen zu laufen (Fig. 1136 c). Es ist natürlich, dass die ganze Musterung des Fensters thunlichst in Einklang mit den Sturmstangen gesetzt wird, so dass auch letztere eine reiche Anordnung annehmen können, wofür Fig. 1137 von der Westseite der Kathedrale von Reims ein Beispiel bietet.

An den Kreuzpunkten der Sturmstangen ist eine Ueberblattung wegen der damit verbundenen Schwächung zu meiden, sie müssen, wie das die alten Werke zeigen, über einander gekröpft werden (s. Fig. 1138).

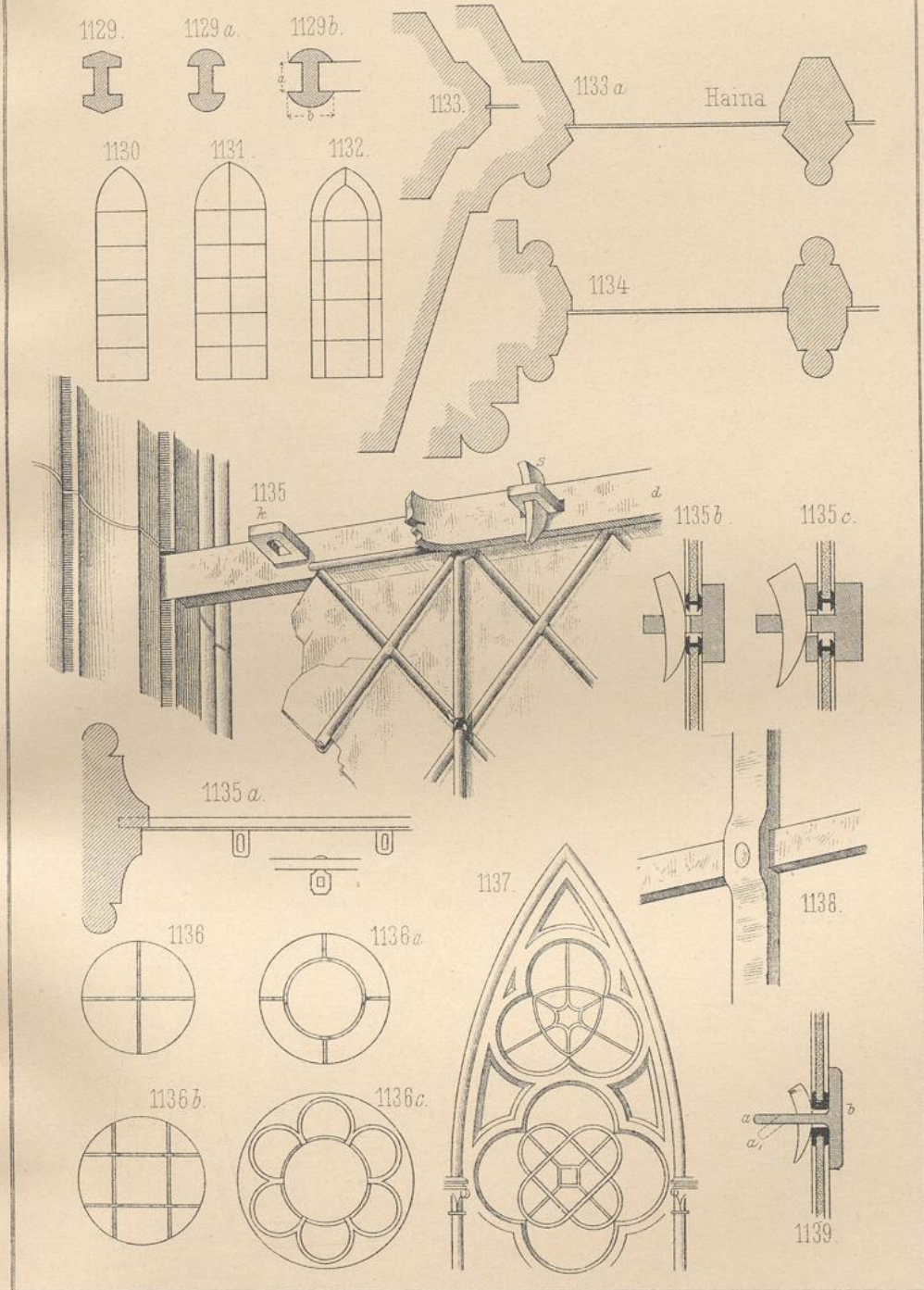
Von den Deckschienen lässt man an den Kreuzpunkten die eine durchlaufen, während die andere mit den Enden stumpf vorstossen kann, überhaupt verlangen die Enden dieser Eisen auch an den Gewänden keine besondere Befestigung. Bei neueren Fenstern hat man zuweilen eine schmale Deckschiene um den ganzen Umriss des Fensters herumgeführt, um die Glastafel auch gegen den Steinfalz zu drücken, es ist das in der Regel aber nutzlos, eine gute Verkittung genügt meist, die gegen das Gewände ausmündenden Windeisen werden aber in kleine Löcher des Gewändes oder in die Nut mit eingeklemmt.

Damit das Sturmeisen dem Winde gut widersteht und nicht zu stark schwankt, darf man es nicht zu dünn nehmen und muss man die Enden unbeweglich einspannen. Ein Eisen mit beweglichen Enden bricht $1\frac{1}{2}$ mal leichter und biegt sich 5 mal so stark durch wie ein festliegendes Eisen gleichen Querschnittes.

Stärke und
Querschnitt
der Sturm-
eisen.

Unter der Annahme eines Winddruckes von 120 kg auf 1 qm und einer zulässigen Beanspruchung des Eisens von 1000 kg auf 1 qcm sind in der nachfolgenden Tabelle die erforderlichen Stärken der Sturmeisen für verschiedene Längen und Abstände von einander zusammengestellt.

Verglasung der Fenster.



Stärke der Sturmstangen.

Freie Länge in cm	Abstand in cm	Geeignete Stärken und Durchbiegung δ bei Wind von 120 kgr auf 1 qm.								
		Breite mm	Dicke mm	δ mm	Breite mm	Dicke mm	δ mm	Breite mm	Dicke mm	δ mm
75	60	25	9	2,0	30	8	2,1	35	8	2,3
75	90	25	11	1,6	30	10	1,7	35	9	1,9
100	60	25	12	2,6	30	11	2,8	35	10	3,1
100	90	30	14	2,3	35	13	2,5	40	12	2,7
125	60	30	14	3,6	35	13	3,9	40	12	4,1
125	90	30	17	2,9	35	16	3,1	40	15	3,4
150	60	30	17	4,4	35	15	4,6	40	14	5,0
150	90	30	20	3,5	35	19	3,8	40	18	4,0

Anm: Die Dicken sind auf ganze Millimeter abgerundet und zwar bei Bruchteilen über $\frac{1}{2}$ nach oben.

Die Tabellenwerte, welche wieder eine auffallende Uebereinstimmung mit den Erfahrungen der Alten zeigen, sind unter der Annahme einer festen Endenspannung aufgestellt, kann letztere nicht mit Sicherheit vorausgesetzt werden, so sind die Dicken der Eisen um $\frac{1}{5}$ zu vergrößern, damit die Materialbeanspruchung die gleiche bleibt; ein solches stärkeres Eisen biegt sich bei beweglichen Enden aber immer noch fast 3 mal so stark durch, als es die Tabelle unter δ für das festliegende dünnere Eisen angibt.

Die 125 bez. 150 m langen Stangen kommen nur für Fenster mit senkrechten Teilungen (Fig. 1131 und 1132) in Frage, bei diesen ist auf die versteifende Wirkung der langen Vertikalstangen so wenig zu rechnen, dass die Querstangen allein im Stande sein müssen, dem Winddruck zu begegnen. Für solche grosse Längen kann man bei weniger streng historisch durchgeführten Neubauten unter Ausnutzung der Fortschritte unserer Walztechnik auch T-Profile von $3\frac{1}{2}$ — 5 cm Breite benutzen, deren liegender Steg *ab* unmittelbar zum Durchstecken der Keile verwertet werden kann. (Fig. 1139.) Durch Niederbiegen der Vorderkante von *a* nach *a*₁ würde sich eine die Unterfuge schützende Tropfkante bilden, zu gleichem Zwecke liesse sich ein Blei-, Kupfer- oder Zinkstreifen über das Eisen biegen, welcher zugleich gegen Rost schützen und eine innere Schwitzwasserrinne abgeben könnte. Im Allgemeinen bewähren sich aber die Konstruktionen des Mittelalters so gut, dass sie kaum einer Vervollkommnung bedürftig sind.

Fenstergewände und Sohlbänke.

Unverglaste Oeffnungen pflegen die Wand einfach rechteckig oder mit Abtreppungen zu durchsetzen (Fig. 1140—1141). Etwaige Verschlussläden legen sich vor die Fläche der Wand oder eines Anschlages (Fig. 1140 a), oder sie schlagen in einen eingetieften Falz (Fig. 1140). Die verglasten Fenster haben im Gegensatz dazu von den ältesten Zeiten an sehr häufig schräge Laibungen, auf die man bei der geringen Fensterweite in verhältnismässig dicken Wänden des Lichteinfalls wegen notgedrungen geführt werden musste. Die Schräge zeigt sich in ihrer schlichten Gestalt (Fig. 1143 und 1143 a), sie tritt mit mehr oder weniger reichen Gliedern in Verbindung (Fig. 1143 b und 1143 c) oder ist ganz in Gliederungen aufgelöst (Fig. 1145), wie die in der mittleren Gotik oft auftretenden Gewände 1144 und 1144 a oder die spätgotischen 1145 und 1145 a. Als typisches Beispiel einer abgetrepten Fensterlaibung kann Fig. 1142 gelten, 1142 a zeigt dieselbe auf Ziegelstein übertragen vom Westbau des Domes zu Riga (Mitte 13. Jahrh.). Weitere Beispiele von Laibungen sind in den Figuren 1146 und 1148—1148 c enthalten.

Form der
Laibung.

Die Beziehungen des Fensters zu dem umschliessenden Schildbogen sind schon weiter oben (S. 350) besprochen, ebenso ist schon darauf hingewiesen, dass die Fensterlaibungen unter Umständen mit den Seitenflächen der Strebepfeiler verwachsen oder selbst sich in dieselben hineinschieben können.

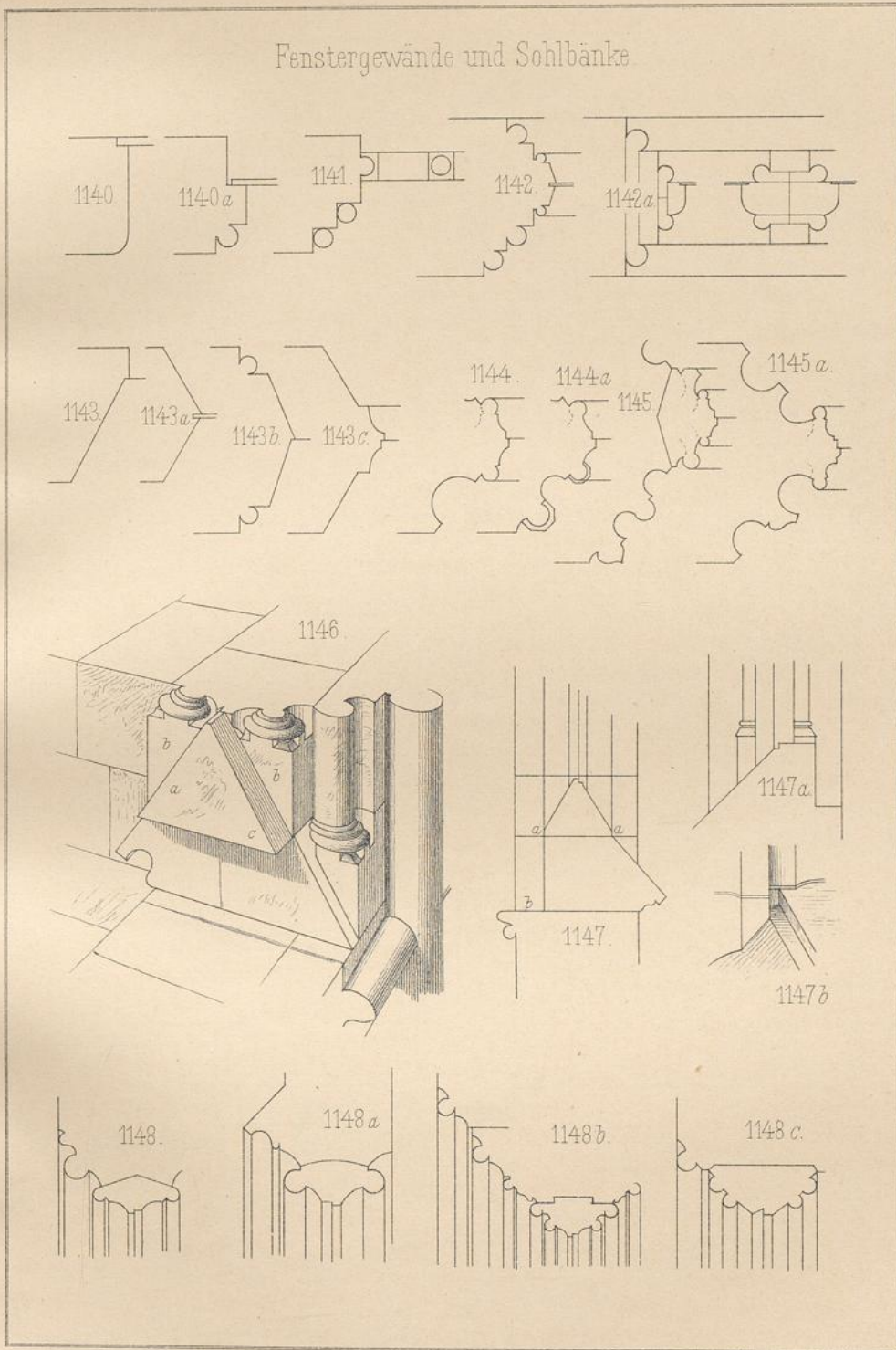
Bei Fenstern mit Mittelpfosten verlangt die regelrechte Ausbildung des Masswerkes (siehe hinten) ein Herabführen der Pfostenglieder an den seitlichen Gewänden, so dass sich hier vorgelegte Halbpfosten, sogenannte Wandpfosten ergeben.

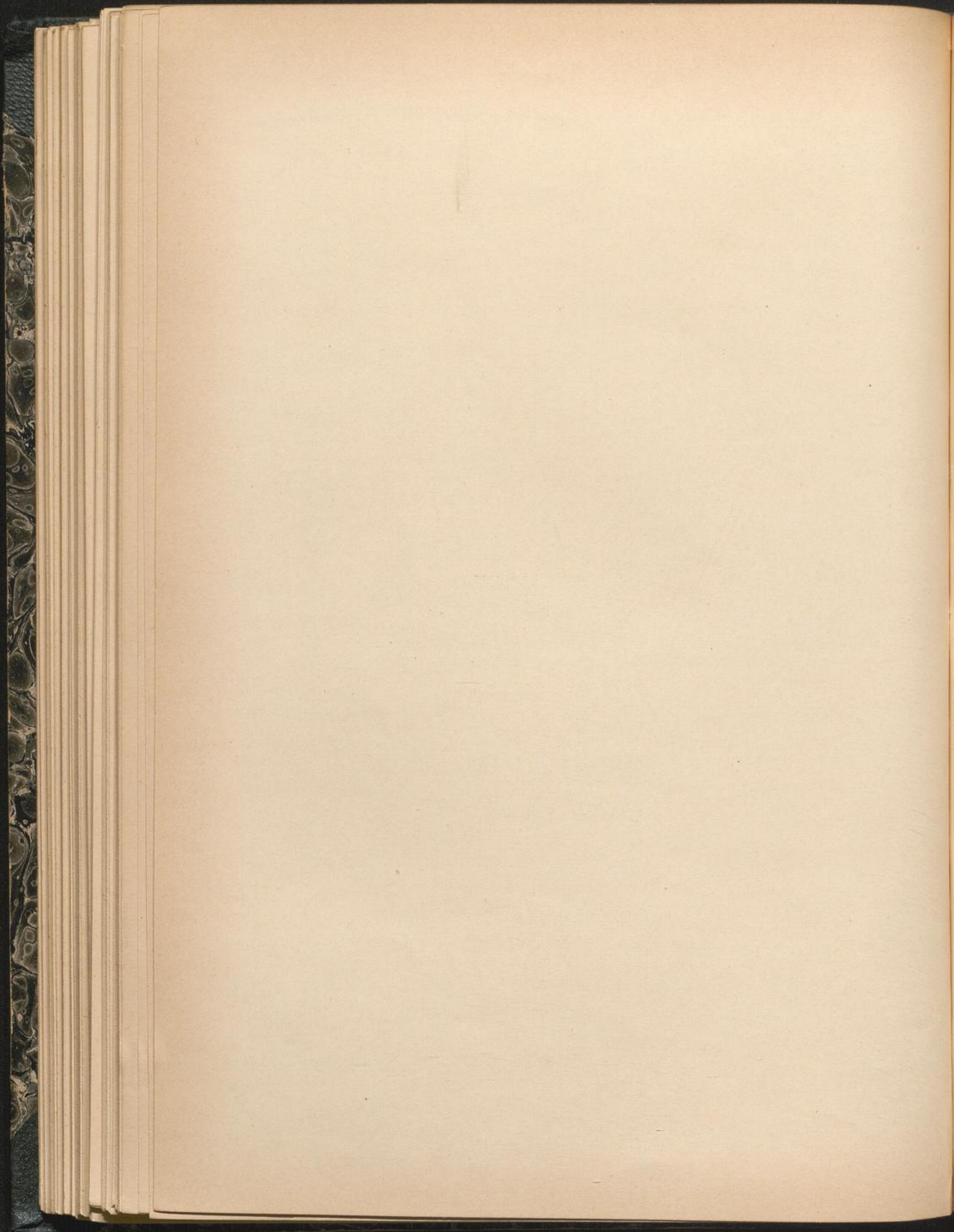
Die Wandpfosten sind dem Gewände oder, wo solches wegfällt, den Strebepfeilern eingebunden, so dass ihre einzelnen Stücke in den Schichtenhöhen bleiben. Seltener bestehen sie aus hohen auf's Haupt gestellten Stücken, welche dann in derselben Weise, wie weiterhin von dem Masswerk gezeigt wird, mit dem Gewände in Verbindung stehen. Häufiger kommen beide Konstruktionen vereinigt an demselben Fenster vor, wie das S. 172 hinsichtlich der Dienste gezeigt wurde.

An dem untersten Werkstücke derselben bleiben dann die Ansätze für die Sohlbank stehen (s. *a* in Fig. 1146), aus deren Höhe in der Regel die Sockel der die Pfosten begleitenden oder bildenden Säulchen *b* genommen sind. Es ist diese Konstruktion der häufig angewandten gegenüber, wonach die Sohlbänke auf die Fensterbreite aus einem Stück gemacht sind, welches unter die Gewände fasst, um deswillen vorzuziehen, weil dadurch der Bruch der Sohlbank vermieden wird, welcher unvermeidlich eintritt, wenn die unter die Gewände fassende Sohlbank in der Mitte untermauert ist und eine stärkere Senkung der Gewände eintritt. Die Entfernung der Stossfuge von der Gewändegliederung, also die hakenförmige Gestalt des Werkstückes ist nötig, um das am Gewände hinabfliessende Wasser nicht unmittelbar der Fuge zuzuführen. Die Sohlbänke bestehen je nach der Stärke der Mauer in der Regel aus zwei oder mehreren aufeinandergelegten Werkstücken, nur bei geringer Stärke aus einem. Das Vorhandensein von Lagerfugen führt dann darauf, die Neigungswinkel der Sohlbank grösser als nach 45° zu machen, damit die Kanten *c* der Werkstücke nicht zu spitzwinklig ausfallen. Zuweilen findet sich etwa nach Fig. 1147 der obere Sohlbankstein in der Breite des Pfostens aus einem Stück gebildet, jedoch so, dass die Schräge unten nicht bis zur Kante hinabreicht, sondern ein kleines, den spitzen Winkel beseitigendes senkrecht Plättchen *a* stehen lässt, unter welches sich aussen die weitere Fortsetzung des Wasserschlages setzt, während innen die Sohlbank durch eine wagrechte Fläche *b* ihren Abschluss finden kann. Bemerkt sei noch, dass ein steiler, wenn möglich weit über 45° hinausgehender Neigungswinkel der Sohlbank immer eine günstige und durch den Gegensatz zu den sonstigen lotrechten und wagrechten Flächen belebende Wirkung hervorbringt, die Anordnung der Sockel der mit den Pfosten verbundenen Säulchen erleichtert und flacheren Neigungen gegenüber den Vorteil bietet, in grösserer Höhe sichtbar zu sein. Die Basen der Säulen können entweder alle in gleicher Höhe liegen, oder wie in Fig. 1146 sich durch die verschieden hoch liegenden Lagerfugen bestimmen. Selten liegen sie oberhalb der Sohlbank.

Die freistehenden Teilungspfosten sind aus hohen auf dem Haupt stehenden Stücken gebildet und behaupten an den älteren Werken ohne durchgehende Eisenschienen allein durch ihre Schwere die lotrechte Stellung. An vielen späteren Werken dagegen finden sich die Pfosten so überschlank gebildet, dass sie jener Sicherung allerdings benötigt sind. Es bedarf wohl keiner Erklärung, wie sehr die ältere Weise vorzuziehen ist und wie schädlich jene Eisen werden können. Da aber eine Verstärkung

Fenstergewände und Sohlbänke





im Verhältnis der zunehmenden Höhe ihre Grenze hat, unter anderen des Aussehens wegen auf eine grössere Feldbreite führen müsste, als sie der Anlage der Verglasung günstig ist, so muss es geraten sein die Pfostenhöhe zu beschränken, entweder durch eine Verringerung der ganzen Fensterhöhe oder durch eine Hinabsenkung des Masswerks, derart dass es seinen Anfang schon unterhalb der Grundlinie des Fensterbogens einnimmt. Durch letzteres Verfahren wird zugleich (wie wir gleich näher sehen werden) die Schwere des Masswerks, also die Belastung der Pfosten, mithin die Stabilität vergrössert. An vielen Werken des 14. und 15. Jahrhunderts findet sich eine Versteifung der Pfosten hergestellt durch nasenbesetzte Spitzbögen, welche sich zuweilen auch mit reicheren Masswerkanordnungen, mit Dreipässen, Vierpässen oder nasenbesetzten Quadraten verbinden und so den Pfosten etwa in halber Höhe einen Querverband verschaffen, häufig auch fallen die Bögen weg und die Verbindung besteht blos in aneinander gereihten Quadraten oder selbst in wagrecht gelegten Pfostenstücken.

An dem unteren Werkstück der Pfosten bleiben in derselben Weise wie an den Wandpfosten die Ansätze für die Sohlbank stehen (s. Fig. 1146).

Das Ganze des Masswerks ist dann dem Fensterbogen in ähnlicher Weise wie eine Holzfüllung dem Rahmen eingeschoben, entweder nach einem Grat (s. Fig. 1148) oder einer Abrundung (s. Fig. 1148a). Ausserdem kommt oft die Einfassung (1148c) vor oder eine Verbindung auf Nut und Feder, welche der Natur des Steines und dem Zweck zufolge nur kurz, 3—5 cm lang, aber breit ist (s. Fig. 1148b). Bei VIOLLET LE DUC ist noch eine weitere Konstruktion angeführt, wonach das Masswerk dem Fensterbogen stumpf untersteht und durch einzelne aus letzterem sich herauschwingende den Trägern der Kapitäle ähnliche Hörner vor jeder seitlichen Abweichung gesichert wird.

Das Masswerk bildet unter Umständen (S. 500) für den Fensterbogen einen Lehrbogen und muss dann vor Zuwölbung des letzteren aufgestellt werden.

Stärke und Belastung der Pfosten.

Bestimmte Massverhältnisse zwischen den Pfosten und der Mauerdicke aufzustellen, wie es das spätere Mittelalter geliebt zu haben scheint (s. S. 352), z. B. die Pfostenstärke nach $\frac{1}{8}$, $\frac{4}{10}$ der Mauerstärke zu bemessen, muss als ein den Ueberlieferungen der Frühzeit und dem statischen Bedürfnis wenig Rechnung tragendes Verfahren bezeichnet werden. Es steht zwar nichts im Wege, den Pfosten kleiner Fenster an Masse zuzusetzen, um sie zu der Gewändegliederung oder zu grösseren benachbarten Fenstern in harmonische Beziehung zu setzen, im allgemeinen ist aber die Grösse, besonders die Höhe des Fensters entscheidend, so dass sich kleine Fenster in dicken Mauern mit verhältnismässig dünnen Pfosten begnügen können, während diese umgekehrt bei hohen Fenstern in dünnen Wänden nahezu durch die ganze Mauerdicke fassen müssen, um stabil zu sein.

Der Grundriss der Pfosten ist mit Rücksicht auf den Lichteinfall schmal und im Einklang mit den Laibungen nach aussen und innen verjüngt (Fig. 1149). Die Tiefe der Pfosten ist dagegen bedeutend, da sie nach dieser Richtung dem Winddruck zu widerstehen haben. Die meisten Pfostengrundrisse kann man nach Ausgleich der Vor- und Rücksprünge etwa auf den vereinfachten Grundriss Fig. 1150 zurückführen. Ein solcher Grundriss von der mittleren Breite b , der äusseren und inneren Breite $\frac{1}{2} b$ und der Tiefe $2 \cdot b$ hat eine Fläche $1,5 \cdot b^2$ und nach der grossen Richtung ein Träg-

Einfügung
des
Masswerks.

Grösse und
Form des
Querschnitts.

heitsmoment $\frac{5}{12} b^4$, nach der kleinen Richtung $\frac{5}{64} b^4$. Die eingetragene Kernfigur (vgl. S. 142) hat eine Länge von $\frac{10}{36} t$.

Der Pfosten muss so stark sein, dass er unter seiner Belastung nicht zerdrückt wird, dass er unter derselben nicht seitlich ausbaucht und dass er schliesslich nicht durch den Wind durchgebogen wird.

Bei nicht gar zu schlanken Pfosten richtet sich die Belastung, welche man ihnen zumuten darf, nur nach der Druckfestigkeit des Materials. Wegen der leicht eintretenden excentrischen Druckübertragung empfiehlt es sich, die Beanspruchung in mässigen Grenzen zu halten und bei Forderung einer reichlich 10fachen Sicherheit auf jeden qcm Querschnitt nur 5 kg bei Ziegelstein in Kalkmörtel, 10 kg bei gutem Ziegelstein in Zementmörtel oder gewöhnlichem Werkstein und höchstens 20 kg bei festem, mit besonderer Sorgfalt versetztem Werkstein zuzulassen. Danach würde ein Querschnitt von der Gestalt der Figur 1150 bei 15 cm Breite und 30 cm Tiefe also 338 qcm Fläche bei Ausführung in gewöhnlichem Ziegelstein $5 \cdot 338 = 1690$ kg, bei festem Werkstein $20 \cdot 338 = 6760$ kg aufnehmen können. In der Tabelle A auf S. 496 sind unter P die zulässigen Gesamtlasten (Oberlast nebst Eigengewicht) für eine Anzahl von Pfostenquerschnitten aufgeführt.

Uebersteigt der Pfosten eine gewisse Höhe, so wird die Gefahr des Ausbauchens grösser als die des Zerdrückens, in Folge dessen ist dann seine Belastung in entsprechend geringeren Grenzen zu halten. Man berechnet aus der gegebenen Pfostenhöhe l die zulässige Last N (und umgekehrt) nach der allgemeinen Knickformel:

$$N = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{s \cdot l^2}$$

Darin ist: N die aufruhende Last nebst dem Eigengewicht der oberen Pfostenhälfte in kg; n ein Koeffizient, der von der Einspannung der Enden abhängt und hier bei richtiger Ausführung zwischen 1 und 4 liegt, zur Sicherheit aber nur = 1 gesetzt werden möge; $\pi^2 = 3,14 \cdot 3,14 = rd 10$; E der Elastizitätsmodul, der nach den allerdings noch unvollkommenen Untersuchungen für Ziegelstein zu 150000, für weichen Werkstein zu 250000, für festen Werkstein zu 400000 angegeben wird; J das Trägheitsmoment nach der betreffenden Biegungsrichtung; s ein Sicherheitskoeffizient, der = 10 gesetzt werden möge, und l schliesslich die Länge in cm.

Wenn keine Sturmisen vorhanden wären, so würde der Pfosten zunächst in seitlicher Richtung ausbauchen, also das kleinste Trägheitsmoment ($\frac{5}{64} l^4$ bei unserem Querschnitt) in Rechnung zu stellen sein. Die Tabelle giebt unter J_{min} diese Trägheitsmomente für die einzelnen Querschnitte an und weiter hinten in 3 Spalten unter l_1 die zulässige Pfostenhöhe bei voller Last P , bei halb so grosser Last und bei alleiniger Wirkung des Eigengewichtes. Einen Pfosten von 15 cm Breite bei 30 cm Tiefe würde man demnach bei voller Last 4,8–6 m, bei halber Last 6,8–8,4 und bei alleiniger Eigenlast selbst 12–16 m lang machen dürfen, um noch die wünschenswerte 10fache Sicherheit gegen seitliches Knicken zu haben.

Verlässt man sich darauf, dass die Sturmstangen eine genügende Verspreizung von Pfosten zu Pfosten bilden, so kommt ein Knicken nur nach der Tiefenrichtung in Frage. Das dann gültige grösste Trägheitsmoment findet sich in der Tabelle unter J_{max} , während die zulässigen Pfostenlängen in den 3 Spalten unter l_2 aufgeführt sind. Die zulässigen Längen sind bei voller Last ungefähr die 40fache Pfostentiefe. Würde man sich bei musterhafter Ausführung und tadellosen Baustoffen mit einer geringeren (z. B. 5- oder $2\frac{1}{2}$ - statt 10fachen) Sicherheit begnügen, so würde man die Tabellenwerte sogar noch um 50–100% steigern können, also die Pfosten bei genügender seitlicher Verspreizung selbst 60 oder 80mal so hoch machen als sie tief sind.

Die Möglichkeit so schlanker Pfosten hängt mit den Elastizitäts- und Festigkeitsverhältnissen der Steine zusammen, auch runde oder quadratische Pfeiler können bei Stein verhältnismässig viel

Grösste Belastung wegen der Druckfestigkeit.

Belastung und Pfostenhöhe wegen des Zerknickens.

schlanker sein als bei Holz oder Eisen. Während bei einer runden oder quadratischen Holzstütze schon bei einer Länge gleich der 10—13fachen Dicke leichter ein Knicken als ein Zerdrücken eintritt, findet dieses bei Steinpfeilern erst bei der 25—40fachen Dicke statt, ein Umstand, den die Alten wieder richtig erkannt und, wo es sein musste, ausgenutzt haben, wie es unter anderen die Pfeiler im Schloss zu Marienburg, der Briefkapelle zu Lübeck, einer Seitenkapelle des Rigaer Domes, die schlanken Säulchen vor der Rose des Strassburger Münsters zeigen. Bei stark belasteten Pfeilern wird man übrigens gut thun, die Schlankheit nicht über 1:20 bis 1:25 zu steigern.

Ist somit der Pfostenlänge hinsichtlich der Knickgefahr ein weiter Spielraum gelassen, so werden ihr um so engere Grenzen gezogen, wenn das Fenster einem starken Winddruck ausgesetzt ist, wie dieses die letzten drei Spalten der Tabelle zeigen, die nach der unten aufgeführten Formel berechnet sind. Ein Ziegelpfosten von 15 cm Breite und 30 cm Tiefe darf demnach bei 75 oder 100 cm Abstand nur 3,5 oder 3,1 m lang sein, bei Ausführung in Zementmörtel oder aus Werkstein 5,0 bez. 4,3 m und bei festem Werkstein 7,1 bez. 6,1 m. Das sind keine grosse Längen und doch ist ein für hochgelegene Fenster nur mässig grosser Winddruck von 120 kg auf 1 qm in Rechnung gebracht, während eine starke Kantenpressung bis zu 10 kg bei Ziegel in Kalkmörtel, 20 kg bei Ziegel in Zementmörtel oder Werkstein und 40 kg bei festem Werkstein zugelassen ist. Weit über die Tabellenwerte hinaus zu gehen, ist demnach nicht geraten, umso mehr als die Beanspruchung im quadratischen Verhältnis der Länge wächst und mit der Pfostenlänge auch die Gefahr unregelmässiger Ausführung sich steigert. Würden die Werte 2—3mal überschritten, so wäre selbst bei fehlerlosem Zustande ein Zerstoren durch den Wind zu erwarten, haltbar würde man so schlanke Pfosten nur noch durch genügend dicke, durchlaufende Sturmstangen machen können (s. S. 492), welche die Pfosten an die Fensterlaibungen festketten. Abgesehen von der Gefahr des Rostens hat das Verlassen auf durchgehende Eisen den grossen Mangel, dass die Pfosten starke, die Fugen lockernde Erschütterungen durchmachen, bevor das biegsamere Eisen zur Wirksamkeit gelangt.

Zulässige
Höhe wegen
des Wind-
drucks.

Der Wind übt auf einen Pfosten eine ähnliche Wirkung aus wie die Last auf einen scheinrechten Bogen, infolgedessen geben die Pfostenenden noch oben und unten einen mit dem Gewölbschub vergleichbaren Enddruck, welcher das auf den Pfosten ruhende Mauerwerk nach oben zu drängen sucht. Es muss sich deshalb ein genügend grosses Gewicht von Mauerwerk dem oberen Pfostenende entgegenstemmen können. Somit giebt es neben der oberen Grenze der Pfostenbelastung (s. P in der Tabelle) auch eine untere Grenze, wenn der Wind den Pfosten nicht durchdrücken soll. Dieser Umstand ist wichtig genug, eine nähere Betrachtung zu fordern.

Geringste
Last zur
Verhütung
der Durch-
biegung
durch Wind.

Damit der Pfosten durch den Wind nicht durchgedrückt wird, muss sich in ihm eine Stützlinie von der Pfeilhöhe x und den Endkräften D (s. Fig. 1151) bilden. Unter Aufstellung der Momentengleichung für die Pfostenhälfte erhält man für D und x die

Beziehung:
$$D \cdot x = \frac{1}{8} \cdot w \cdot l^2.$$

Darin ist l die Pfostenhöhe in Centimetern und w der auf den Pfosten nebst zugehöriger Glasfläche wirkende Winddruck für je 1 cm Höhe. Am oberen Pfostenende muss die Endkraft D oder genauer die senkrechte Seitenkraft derselben ebenso gross sein wie die obere Belastung des Pfostens, ist diese fest gegeben, so ist damit die Pfeilhöhe x der Stützlinie nach obiger Gleichung zu ermitteln. Je kleiner D wird, um so grösser wird x , nun darf letzteres aber eine bestimmte Grösse nicht überschreiten, wenn der Pfosten haltbar bleiben soll. Wird x gleich der Pfostentiefe t , so findet unbedingt Einsturz statt, da mit der Zugfestigkeit des Mörtels hier ganz besonders nicht gerechnet werden kann.

Grösste zulässige Belastung und Höhe von Fensterpfosten verschiedener Querschnitte.

Ausführungsart	Bezeichnung der Pfosten		Eigenschaft des Querschnitts				Druck auf 1 qcm	Grösste zulässige Gesamtlast P in kg	Zulässige Höhe der Pfosten in Meter bei genügender Sicherheit gegen								
	Querschnitt	Fläche F qcm	Kernlänge cm	Trägheitsmoment kleinstes j min.	grösstes j max.	Kriechen seitlich durch Last P h_1 in m			$\frac{P}{2}$ Last h_2 in m	Eigenlast durch h_3 in m	Kriechen n. d. Tiefe durch Last P h_4 in m	$\frac{P}{2}$ Last h_5 in m	Eigenlast durch h_6 in m	Biegung durch Wind bei Abstand v. M. z. M. 0,75 L in m	1,0 L in m	1,5 L in m	
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	10	20	150	5,6	781	4170	5 10 20	750 1500 3000	4,0 3,6 3,2	5,6 5,1 4,6	9,0 11 12	9,1 8,3 7,5	13 12 11	16 19 22	1,9 2,7 3,8	1,7 2,4 3,3	1,4 1,9 2,7
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	15	30	338	8,3	3960	21100	5 10 20	1690 3380 6760	6,0 5,4 4,8	8,4 7,6 6,8	12 14 16	14 13 11	19 18 16	20 23 —	3,5 5,0 7,1	3,1 4,3 6,1	2,5 3,5 5,0
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	20	40	600	11,1	12500	66600	5 10 20	3000 6000 12000	8,0 7,2 6,4	11 10 9	15 18 20	18 17 15	— 24 21	24 — —	5,5 7,7 11	4,7 6,7 9,4	3,8 5,5 7,7
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	25	50	937	13,9	30500	163000	5 10 20	4685 9370 18740	10,0 9,0 8,0	14 13 12	17 20 23	23 21 19	— — —	— — —	7,6 11 15	6,6 9,3 13	5,4 7,6 11
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	30	60	1350	16,7	63300	338000	5 10 20	6750 13500 27000	12 11 10	17 15 14	19 23 —	— — —	— — —	— — —	10 14 20	8,6 12 17	7,0 10 14
Ziegelstein in Kalkmörtel, del. in Zement oder festor Werkstein.	35	70	1840	19,5	117000	625000	5 10 20	9200 18400 36800	14 13 11	20 18 16	21 24 —	— — —	— — —	— — —	13 18 25	11 15 22	8,9 13 18

Anm.: Längen über 10 m sind auf ganze Meter abgerundet, Längen über 25 m sind nicht aufgenommen.
 Bei der Biegung durch Wind ist keine Zugfestigkeit vorausgesetzt, aber die nur selten eintretende grösste Kantendruckung als das Doppelte der Durchschnittsdruckung in Rechnung gestellt, also der Quadratcentimeter mit 10, 20, 40 kg je nach Material.



Tabelle B.
Geringste Belastung der Fensterpfosten zur Sicherung gegen Winddruck.

Pfo- stensen- querschnitt	Abstand der Pfosten von Mittelp. Mitte m	Wind- druck auf 1 cm Pfo- stensenhöhe w in kg	Geringste Belastung $D = \frac{w \cdot l^2}{8 \cdot x}$ bei einer Höhe des Pfostens 1						Grösste zulässige Last P (vgl. Tabelle A)					
			2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	8 m	10 m	Ziegel	gew. Werkstein	fester Werkstein		
10	20	0,75	450	1010	1800	—	—	—	—	—	—	750	1500	3000
	30	1,00	600	1350	2400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		1,50	900	2030	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	30	0,75	300	675	1200	1875	2700	4800	—	—	—	1690	3380	6760
		1,00	400	900	1600	2300	3600	6400	—	—	—	—	—	—
	1,50	600	1350	2400	3750	5400	—	—	—	—	—	—	—	
20	40	0,75	225	506	900	1400	2020	3600	5620	—	—	3000	6000	12000
		1,00	300	675	1200	1880	2700	4800	7500	—	—	—	—	—
	1,50	450	1010	1800	2810	4050	7200	11250	—	—	—	—	—	
25	50	0,75	180	405	720	1125	1620	2880	4500	—	—	4685	9370	18740
		1,00	240	540	960	1500	2160	3840	6000	—	—	—	—	—
	1,50	360	810	1440	2250	3240	5760	9000	—	—	—	—	—	
30	60	0,75	150	338	600	987	1350	2400	3750	—	—	6750	13500	27000
		1,00	200	450	800	1250	1800	3200	5000	—	—	—	—	—
	1,50	300	675	1200	1875	2700	4800	7500	—	—	—	—	—	
35	70	0,75	128	290	515	805	1160	2060	3220	—	—	9200	18400	36800
		1,00	171	386	686	1070	1540	2740	4300	—	—	—	—	—
	1,50	257	580	1030	1610	2320	4120	6440	—	—	—	—	—	

Anm.: Die Tabelle gilt für einen Winddruck von 120 kg auf 1 qm unter der Annahme, dass in jedem Pfostenquerschnitt der Druck in der mittleren Hälfte bleibt (Pfeilhöhe x der Drucklinie = $\frac{1}{2}$ t, s. Fig. 1151). Wird verlangt, dass der Druck im Kern bleibt ($x = \frac{10}{36}$ t), so sind die Werte von D mit 9:5 zu multiplizieren. Eine fortgesetzte Verringerung der Tabellenwerte von D würde selbst bei bester Ausführung einen Einsturz herbeiführen, noch bevor der Grenzwert $\frac{1}{2}$ D erreicht wäre.

Gewöhnlich wird man x nicht über etwa die Hälfte der Pfostentiefe anwachsen lassen dürfen oder wenn man noch sicherer gehen will nicht über die Kernlänge ($\frac{10}{36}t$). Wenn man ein solches x also $\frac{1}{2}t$ oder $\frac{10}{36}t$ in die Gleichung einsetzt, so findet man dadurch den zulässigen Mindestwert der Pfostenbelastung D . (Siehe die Tabelle B, dieselbe ist unter Annahme von $x = \frac{1}{2}t$ aufgestellt.)

Beispiel: Es soll ermittelt werden, wie schwer ein gewöhnlicher Werksteinpfeiler von 4 m Höhe bei 20 cm Breite und 40 cm Tiefe mindestens belastet sein muss, damit er genügende Sicherheit gegen einen Winddruck von 120 kg auf 1 qm bietet, wenn die Pfostenentfernung von Mitte zu Mitte 90 cm beträgt. In die Formel ist einzusetzen $x = 20$ cm, $l = 400$ cm und $w = 120 \cdot 0,90 : 100 = 1,08$ also:

$$D \cdot 20 = \frac{1}{8} \cdot 1,08 \cdot 400 \cdot 400, \text{ daraus folgt } D = 1080 \text{ kg als geringste Last.}$$

(Bei $x = 40$ cm also $D = 540$ kg würde bereits Einsturz erfolgen.) Will man eine noch weitergehende Sicherheit haben, so würde man x nur gleich der Kernlänge also 11 cm setzen müssen, was als geringste Last 1960 oder rund 2000 kg ergeben würde. Die grösste zulässige Last P dieses Pfeilers ist nach der Tabelle = 6000 kg, worin aber noch das Eigengewicht von etwa 500 kg einbegriffen ist, also ist die grösste Oberlast 5500 kg. Man hätte demnach so zu entwerfen, dass der Pfeiler höchstens 5500 kg, mindestens aber 1080 oder besser 2000 kg Last zu tragen bekäme, also $\frac{1}{2} - 1$ cbm Stein.

In ähnlicher Weise kann man für jeden einzelnen Fall eine obere und untere Belastungsgrenze berechnen, die übrigens beide um so enger zusammenfallen, je mehr sich die Pfeilerlänge der oberen zulässigen Grenze nähert. Bei den in den letzten 3 Spalten der Tabelle A angegebenen Pfeilerlängen fallen die grösste und kleinste zulässige Last gänzlich zu dem Werte P zusammen, wenn die Bedingung aufgestellt wird, dass der Druck im Kern bleiben und die Pressung bei Wind nicht über 10, 20 bzw. 40 kg an der Kante wachsen soll. Bei verhältnismässig langen Pfeilern muss also mit besonderer Sorgfalt die Last abgewogen werden, wenn das Material nicht über Gebühr beansprucht werden soll.

In der Tabelle B sind für 6 verschiedene Pfeilerquerschnitte die geringsten Belastungen zur Sicherung gegen einen Winddruck von 120 kg auf 1 qm aufgestellt und zwar für einen mittleren Abstand der Pfeiler von 0,75, 1,0 und 1,5 m bei einer Pfeilerhöhe von 2–10 m. Zum Vergleich sind die durch die Druckbeanspruchung gebotenen oberen Grenzen der Lasten, welche bereits in der Tabelle A enthalten, noch einmal in den 3 letzten Spalten aufgeführt. Zu der Tabelle sei bemerkt, dass die unter D aufgeführten geringsten Lasten hinreichen bei gut ausgeführten nicht gar zu stark den Stürmen ausgesetzten Fenstern, dass aber bei wenig guter Ausführung und ausgesetzter Lage eine Vergrösserung um $\frac{1}{4}$ oder das Doppelte geboten ist, während andererseits bei besonders geschützt liegenden Fenstern die Pfeilerlasten entsprechend verringert werden können.

Anwendung der vorstehenden Ergebnisse.

A. Länge und Stärke der Pfeiler. Es ist soeben gezeigt, welche Grenzen der Höhe eines Pfeilers von bestimmtem Querschnitt durch die Gefahr des Zerknickens, noch mehr aber durch die Windbeanspruchung gezogen werden (s. S. 495 und Tabelle A).

Beschränkung der Pfeilerhöhe durch Masswerk.

Um diese Grenzen einzuhalten, ist es das einfachste, die Fenster nicht übermässig hoch zu machen, die Pfeilerabstände gering zu halten und den Pfeilern selbst einen genügend starken Querschnitt zuzuweisen. Nun kann aber unter Umständen eine Steigerung der Fensterhöhe ohne eine zu grosse Verstärkung der Pfeiler erstrebenswert erscheinen. Das nächste Mittel dazu, das schon die früheste Gotik an die Hand giebt, bietet ein weit herabgeführtes Fenstermasswerk, das nicht nur architektonischen, sondern in mehr als einer Hinsicht auch praktischen Wert hat (s. S. 500). Ein Vergleich eines

spätgotischen Pfostenfensters (Fig. 1152) mit dem frühgotischen Masswerkfenster (Fig. 1153) zeigt, wie merklich verschieden sich die Pfostenlänge bei sonst gleicher Fenstergrösse herausstellt.

Ein zweites Mittel, die freie Pfostenlänge zu beschränken bietet ein arkadenartiges Masswerk im unteren Fensterteil, s. Fig. 1154.

Wo auch dieses noch nicht ausreicht, bleibt als drittes Mittel eine versteifende Zwischenteilung an einer Stelle oder selbst an mehreren Stellen übereinander, s. *ab* in Fig. 1155. Sie kann aus einem horizontal liegenden Pfostenstab, aus Bogenreihungen mit oder ohne Wimpergbekrönungen (Fig. 1155 b) oder schliesslich aus einem galerieartig durchlaufenden Masswerk (Fig. 1155 c) bestehen; unter Umständen kann zur Ueberwachung der Fenster an solchen Stellen selbst ein Umgang herumgeführt werden, der durch einen Bogen von den Laibungen aus oder durch besondere Stützen von unten getragen werden kann und um so wirksamer zur Versteifung des Fensters beiträgt.

Querversteifung
hoher
Pfosten.

All diese Querversteifungen, mögen sie durch die Mittelteilung *ab*, durch die unteren Arkaden bei *cd* oder durch die obere Masswerkfläche in der Höhe *ef* bewirkt werden, haben nicht allein ein Ausbauchen der Pfosten, sondern ein Eindrücken durch den Wind zu verhüten. Die Versteifung muss daher im Grundriss gesehen (vergl. Fig. 1156) wie ein scheinbarer Bogen wirken. Der Winddruck gegen Pfosten und Glas wird auf die Versteifung übertragen, es kommt z. B. auf den Punkt *p* der Steife *ab* (Fig. 1155) der Winddruck gegen die schraffierte Fläche, der sich aus dem Inhalt dieser Fläche multipliziert mit dem Einheitsdruck (z. B. 120 kg auf 1 qm) leicht berechnet. So erhält jeder Kreuzungspunkt seinen bestimmten Winddruck, vergl. K_1, K_2, K_3 im Grundriss Fig. 1156. Diese Kräfte setzen sich zu einer Stützlinie mit der Pfeilhöhe *x* zusammen, die man auf graphischem oder rechnerischem Wege näher verfolgen kann. Für letzteres Verfahren möge ein kleines Beispiel Platz finden.

Beispiel: Ein Fenster von 3,6 m Breite möge 3 Pfosten von 0,9 m mittlerem Abstand haben, welche aus Werkstein in dem in Fig. 1150 dargestellten Querschnitt von 20 cm Breite, 40 cm Tiefe, 600 qcm Fläche und 11 cm Kernlänge aufweisen. In mittlerer Höhe hat das Fenster einen horizontalen Stab von dem gleichen Querschnitt (*ab* in Fig. 1155), über und unter demselben beträgt die freie Pfostenlänge (*ae* und *ac*) 5,0 m. Der Winddruck auf jeden Kreuzpunkt (s. die schraffierte Fläche) beträgt demnach $5,0 \cdot 0,9 = 4,5$ qm mal 120 kg = 540 kg = $K_1 = K_2 = K_3$ (Fig. 1156). Stellt man die Forderung, dass die Stützlinie in dem Kern bleiben soll, dass also $x = 0,11$ m wird, so heisst die Momentengleichung für die Hälfte A B der Steife, auf welche der Druck K_1 und die Hälfte des Druckes K_2 wirkt, bezogen auf den Drehpunkt M:

$$H \cdot x = K_1 \cdot 0,90 + \frac{1}{2} \cdot K_2 \cdot 1,80.$$

Daraus berechnet sich nach Einsetzung der Werte $x = 0,11$, $K_1 = K_2 = 540$ die Schubkraft in der Steife zu: $H = 8833$ kg.

Das würde in dem 600 qcm grossen Querschnitt eine Durchschnittspressung von $8833 : 600 = 14,7$ kg oder bei der angenommenen Pfeilhöhe gleich der Kernlänge eine grösste Kantenpressung von doppelter Grösse, also 29,4 kg auf den qcm ergeben. Das sind Beanspruchungen, die bei sehr guter Ausführung in recht festem Werkstein noch zulässig sind.

Bei weniger festem Stein oder einer noch grösseren Breite des Fensters würde der einfache horizontale Pfostenstab nicht mehr genügen, man würde dann steifere Anordnungen zu wählen haben, z. B. zwei masswerkartig verbundene Stäbe übereinander, die sich dann in die Arbeit teilen würden. Eine ähnliche Versteifung muss im unteren Teile des Masswerkes in der Richtung *ef* und im oberen Abschluss der Arkaden *cd* (Fig. 1155) möglich sein, die Druckfläche des Windes ist hier aber event. etwas geringer.

Da die Querstreifen als scheinbare Bögen zu wirken haben, können die Stossfugen in ihnen entsprechend schräg geschnitten werden.

B. Belastung der Pfosten. Weiter oben (s. S. 494 und Tabelle A und B) ist gezeigt, welche grösste Last der Pfosten ohne zu grosse Beanspruchung tragen kann und

welche geringste Last er andererseits haben muss, um nicht durch den Wind durchgedrückt zu werden. Es kommt nun darauf an, die Pfostenlast in schicklicher Weise anzubringen; sie kann entweder beständig auf dem Pfosten ruhen oder aber nur dann zur Wirksamkeit gelangen, wenn der Wind den Pfosten zu kanten sucht.

Belastung
durch das
Masswerk.

1. Die vorzüglichste Lösung ist jedenfalls erzielt, wenn das Masswerk allein schwer genug ist, um als genügende Auflast zu dienen, was bei den meisten frühgotischen Masswerkfenstern der Fall ist. Die beste Ausführung vollzieht sich dann in der Weise, dass die Pfosten und das Masswerk erst nachträglich nach dem Setzen des übrigen Mauerwerkes eingesetzt werden, so dass oben zwischen Masswerk und Fensterbogen eine offene Fuge bleibt, während das Herausfallen des Masswerkes durch nutartige Verbindung u. s. w. verhütet wird (s. Fig. 1148—1148 c).

Zeitweise
Belastung
durch den
Fenster-
bogen.

2. Ein anderer Fall liegt vor, wenn das Masswerk an sich nicht schwer genug ist, um bei Wind die Pfosten standfähig zu erhalten, sich aber so unter den Fensterbogen legt, dass hier für gewöhnlich zwar keine erhebliche Kraftübertragung stattfindet, dass sich dagegen bei Wind das Masswerk fest unterpressen kann. Natürlich muss das Gewicht des Fensterbogens nebst dem darauf liegenden Mauerwerk mindestens so gross sein, dass es nicht gehoben wird (s. Tabelle B), andererseits kann aber diese obere Masse unbegrenzt vermehrt werden, da sie für gewöhnlich nicht auf die Pfosten drückt.

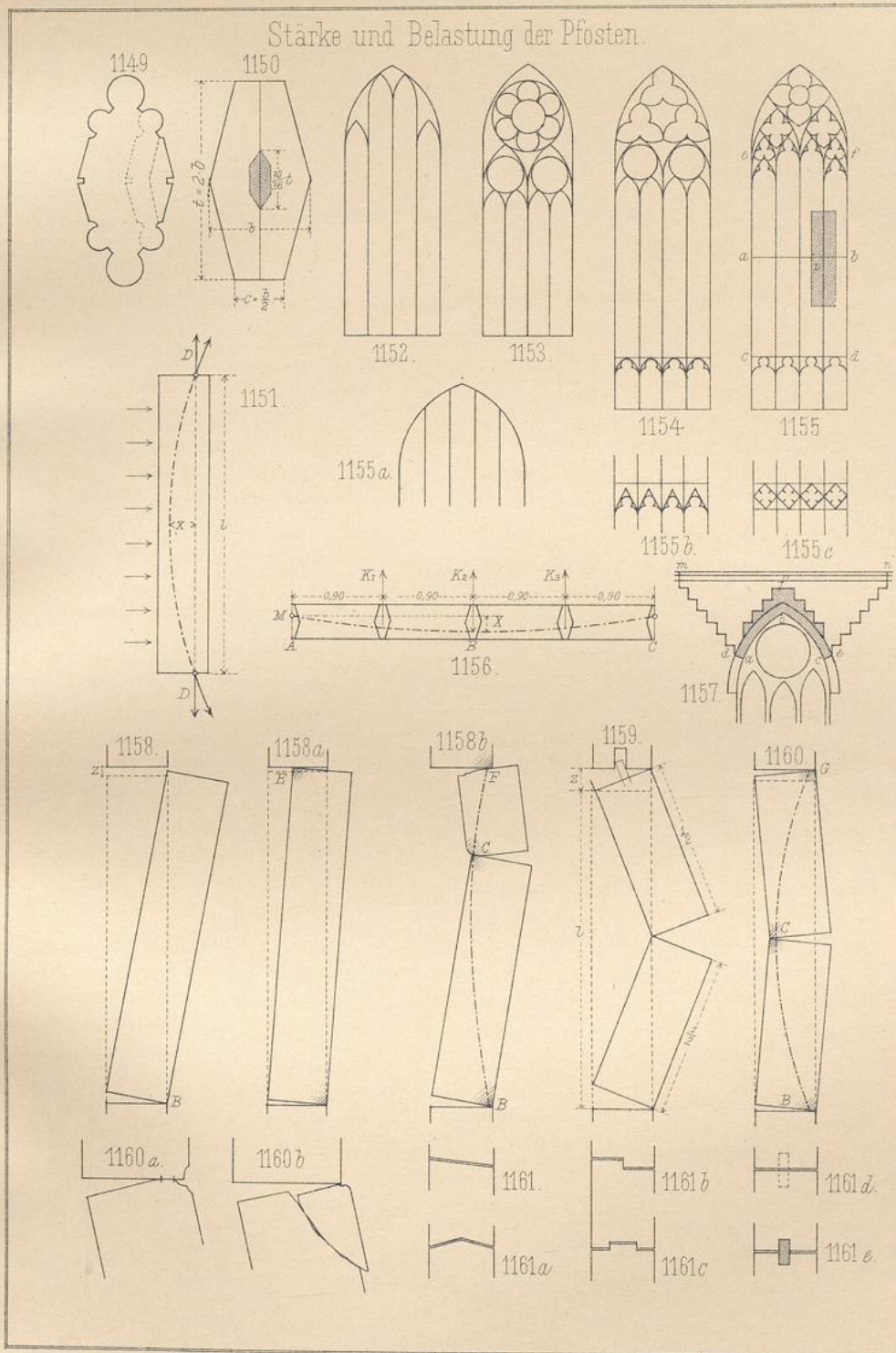
Das richtige Verhalten der einzelnen Teile ist stark abhängig von der Art der Ausführung. Haben sich die Pfosten zu wenig gesetzt, so wird sich der Fensterbogen auf ihnen bez. ihrem Masswerk aufhängen und sie zerpressen, wenn die Oberlast der Fensterbögen sehr gross ist (s. folgende Seite). Haben sich dagegen die Pfosten zu stark gesetzt, so dass sich zwischen dem Masswerk und Fensterbogen eine offene Fuge, und sei sie auch nur von $\frac{1}{2}$ oder 1 mm Dicke, gebildet hat, so treten bei Wind wegen der Starrheit der Steine schon ungünstige Bewegungen und Kantenpressungen ein, die unter Umständen nachteilig werden können (s. hinten S. 502). Bei der Ausführung wird man daher das Pfostenwerk, je nachdem es sich weniger oder stärker setzt, nachträglich, oder etwa gleichzeitig einzusetzen haben, im letztern Falle kann sogar das Masswerk als Lehrbogen für den Fensterbogen benutzt werden, wobei es sich empfehlen könnte zwischen beiden Bleikeile in geringen Abständen einzulegen, welche eine zu starke Druckübertragung von oben verhindern können.

Gerade so wie sich in soeben beschriebener Weise das Masswerk unter den Fensterbogen stützt, muss bei Fenstern von ineinander geschalteten Systemen das „junge“ System sich bei Wind in dem „alten“ verspannen, was bei der gleichartigen Ausführung beider auch thatsächlich mit grosser Sicherheit gewährleistet wird. Da die starken Querschnitte der alten Pfosten auch oben im Masswerk fortgeführt werden, so wird dessen Gewicht in vorteilhafter Weise gesteigert, so dass ein solches zusammengesetztes Fenster als günstige Konstruktion zu bezeichnen ist, die der Gesamtwirkung nach meist dem Fall 1 zuzuweisen ist.

Dauernde
Belastung
durch den
Fenster-
bogen.

3. Der dritte Fall besteht darin, dass der Fensterbogen mit seiner Last beständig auf das Masswerk drückt und somit dieses und die Pfosten in Spannung erhält. Man kann diese Wirkung sicher erzielen, indem man die Pfosten und das Masswerk aus einem sich weniger als das übrige Mauerwerk setzenden Baustoff aufführt und den Fensterbogen über dem fertigen als Lehrbogen dienenden Masswerk zuwölbt; wenn sich nun das Gemäuer seitwärts vom Fenster setzt, so wird der Bogen sich auf die Masswerkfüllung legen, sich sozusagen darauf aufhängen, was selbst in merklichen Rissen zum Ausdruck gelangen kann. Je nach dem Verhältnis des Setzens wird sich der Bogen nur mit dem kleinen schraffierten Mauerstück *dfe* (s. Fig. 1157) aufstützen oder mit dem grossen Stück *mabcn*; es kann auch möglich sein, dass sich gewöhnlich nur das kleine Stück auflegt, bei Wind aber, wenn sein Gewicht allein nicht ausreicht, das grosse Mauerstück zur Mitwirkung gebracht wird.

Stärke und Belastung der Pfosten.



In welcher Neigung die Linien *md* und *en* ansteigen, hängt von der Verzahnung des Gemäuers ab. Das Gesamtgewicht des Bogens nebst Oberlast *mdabccn* unter Zurechnung der etwaigen Gewölbe- oder Dachlasten muss mindestens so gross sein, dass das Mauerwerk bei Wind nicht durch die Pfosten gehoben wird (siehe D in Tabelle B) und darf höchstens so gross sein, dass die Pfostenlast unter der zulässigen Grenze bleibt (siehe P in Tabelle A und B), andernfalls ist diese Art der Pfosten-einspannung nicht am Platze. Das Masswerk verliert bei dieser Ausführungsweise sehr an Bedeutung, so dass es stark eingeschränkt oder selbst ganz fortgelassen werden kann, es treten dann die Pfosten direkt unter den Fensterbogen, wie bei vielen Werken der Spätgotik und der Renaissance; damit ist der nüchternste Ausdruck dieser Ausführungsart gewonnen, die überhaupt konstruktiv und ästhetisch am wenigsten befriedigt.

Die beste Lösung bleibt immer ein hinlänglich schweres, einfaches oder zusammengesetztes Masswerk, das die Hülfe des Fensterbogens gar nicht oder doch nur in den dringlichsten Fällen zu beanspruchen braucht. Die Grösse der über dem Fenster sich aufbauenden Mauerlast ist sodann von dem Fenster selbst gänzlich unabhängig gemacht.

C. Ausführung der Fugen und Verdrückungen. Die Fugen werden neuerdings in Kalk- oder Zementmörtel ausgeführt, wobei zu beachten ist, dass sich der Kalkmörtel stärker setzt und länger plastisch bleibt, während Zementmörtel rasch erstarrt und dabei sein Volumen wenig ändert. Welcher Mörtel mehr geeignet ist, lässt sich nur von Fall zu Fall entscheiden, wobei die obigen Betrachtungen über die Belastung der Pfosten die nötigen Fingerzeige bieten werden. Bei hohen Werksteinpfeilern in Zementmörtel kann es sich zur Unschädlichmachung kleiner Verdrückungen und der daraus hervorgehenden exzentrischen Druckübertragungen sehr empfehlen, eine Fuge, die obere oder untere, besser aber drei Fugen, nämlich die obere, mittlere und untere mit einer Bleiplatte auszufüllen und zwar am richtigsten so, dass die Fuge an der Aussen- und Innenkante $\frac{1}{2}$ bis 1 cm frei bleibt.

Ausführung
der Fugen.

Wenngleich auch dem Steinmaterial eine gewisse Elastizität nicht fehlt, so kann es doch nur in mässigen Grenzen seine Länge ändern. Drückt man z. B. einen Steinstab um mehr als 1:10000 seiner Länge zusammen, so pflegt dabei die gewöhnlich als zulässig zu erachtende Beanspruchung schon überschritten zu werden, wird die Verkürzung fortgesetzt, so werden die meisten Steine zerdrückt werden, bevor die Verkürzung 1:1000 erreicht hat. Durch ein Zusammendrücken kann sich daher ein Pfosten, der in Folge zu grosser Länge zu stark belastet ist, nur dann der Ueberlastung entziehen, wenn der Längenunterschied ein recht geringer ist. Eine Verlängerung eines zu kurzen Pfostens kann überhaupt kaum in Frage kommen, da sich bei der geringen Zugfestigkeit des Steines und Mörtels sehr bald die Fugen öffnen werden. Es ist deshalb angezeigt zum Schluss noch kurz zu verfolgen, welche Gefahren dem Pfostenwerk erwachsen können, wenn sich in Folge von Verdrückungen oder unregelmässigen Setzungen einzelne Fugen öffnen.

Zu lange
und zu kurze
Pfosten.

Bei Fenstern mit schwerem, lose eingesetztem Masswerk (s. Fall 1, S. 500) ist ein Öffnen der Fugen nicht leicht zu fürchten; wenn sich die Pfosten senken, so rückt das Masswerk nach, zwischen ihm und den Pfosten wird sich also keine Fuge bilden können, eine Erweiterung der in diesem Falle von vornherein beabsichtigten Fuge oben im Falze unterhalb des Fensterbogens ist aber unschädlich. Nur dann, wenn sich das Masswerk zwischen den Laibungen fest eingeklemmt haben sollte, würde auch bei diesem Fenster eine nachteilige Fuge zwischen Masswerk und Pfosten sich bilden können.

Bildung
offener
Fugen.

Mehr ist das Öffnen der Fuge zu fürchten bei Fenstern, welche eine geschlossene Druckübertragung vom Fensterbogen auf die Pfosten voraussetzen (Fall 2 und 3, S. 500)

und zwar kann das Öffnen zwischen Fensterbogen und Masswerk oder zwischen Masswerk und Pfosten eintreten, der Kürze wegen wollen wir uns nur mit letzterem befassen.

Umkanten
des Pfostens
bei offener
Fuge.

Würden keine seitlichen Kräfte wirken, so wäre das Öffnen der Fugen belanglos, sobald aber kräftiger Wind eintritt, wird selbst ein recht niedriger Pfosten ohne obere Last um die untere Ecke B (Fig. 1158) kanten, da die Angriffsfläche des Windes gross, das Eigengewicht aber sehr klein ist. Ist die offene Fuge Z genügend breit, so wird der ganze Pfosten hinüberkippen können, wenn man von einem etwaigen Zurückhalten durch die Sturmstangen absieht, und zwar können Pfosten, deren Länge l 10 mal die Tiefe t übersteigt, umkippen, wenn $Z = \frac{1}{200} l$ ist. Schlankere Pfosten von der Länge $l = 15 \cdot t$, können umfallen bei $Z = \frac{1}{450} \cdot l$ und sehr schlanke von $l = 20 \cdot t$ sogar schon bei $Z = \frac{1}{800} \cdot l$. Ein 6 m langer und 40 cm tiefer Pfosten ($l = 15 \cdot t$) würde also unbehindert kippen können, wenn die Fuge Z mindestens $6,0 : 450$ also 0,013 m oder $1\frac{1}{3}$ cm beträgt.

Ist die Fuge weniger weit, so wird der Pfosten nicht unbehindert umkippen, es wird sich zunächst die Kante E gegen die obere Fläche stützen, wie es Fig. 1158 a zeigt. Ist z. B. bei dem erwähnten 6 m langen Pfosten die Fuge statt $1\frac{1}{3}$ cm nur $\frac{1}{3}$ cm, so wird sich die Ecke E unter die Mitte der oberen Fläche legen. In dieser Lage wird der Pfosten aber voraussichtlich nicht verharren, sondern im nächsten Augenblick nach Art der Fig. 1158 b brechen. Es wird sich dann eine Stützlinie durch die Punkte F C B bilden, die eine grosse Längspressung erzeugt (s. S. 495). Da die Berührungskanten diese Pressung nicht übertragen können, wird sich an ihnen der Stein so lange zermalmen, bis eine genügend grosse Berührungsfläche erzeugt wird (s. Fig. 1160 a), findet dabei kein Abspalten grösserer Teile statt (s. Fig. 1160 b), so kann ein Pfosten aus sehr festem Stein unter Umständen dadurch zur Ruhe kommen und vor dem Einsturz bewahrt bleiben. Ob der Pfosten nach Aufhören des Windes in die alte Lage zurückkehrt, ist fraglich, jedenfalls wird er durch häufige Wiederholung dieser Bewegungen leicht zerstört werden können.

Durch-
drücken des
Pfostens bei
offener
Fuge.

Weit weniger gefährlich gestaltet sich die offene Fuge, wenn das Umkippen des Pfostens in ganzer Länge dadurch verhindert wird, dass in der zu fürchtenden offenen Fuge die gegenseitige Verschiebung der Endflächen verhütet wird, sei es durch Verdübelung (Fig. 1161 d) oder durch einen der Fugenschnitte von Fig. 1161 bis 1161 e oder schliesslich durch ein oberes und unteres Einlassen der Sturmisen (Fig. 1161 e). Fürchtet man, dass das Öffnen nicht mit Bestimmtheit in der oberen, sondern in einer der darunter liegenden Fugen eintreten könnte, so ist auch in letzteren die Verschieblichkeit zu verhindern. Wenn sich nun durch Senkungen des Pfostens eine offene Fuge Z oben bildet, so kann der Pfosten nur nach Art der Fig. 1159 brechen, dazu ist aber eine mindestens 4 mal so grosse Fugenweite Z erforderlich als zum Umkippen nach Art der Fig. 1158. Der obige Pfosten von 6 m Länge würde also einen Spielraum von $5\frac{1}{3}$ cm haben müssen, um sich frei durchschlagen zu können. Da auf solche starke Verdrückungen aber nicht zu rechnen ist, so wird nur ein mässiges Einbiegen, wie es Fig. 1160 zeigt, zu erwarten sein. Dabei öffnen sich 3 Fugen und es bildet sich eine Stützlinie BCG, die wieder ein Zermalmen der Kanten (s. Fig. 1160 a) nach sich zieht bis zu einer im glücklichen Falle, jedoch nicht immer eintretenden Ruhelage. Sobald grössere Stücke abplatzen (Fig. 1160 b), erfolgt Einsturz, immer bewegt sich an den Berührungsstellen die Beanspruchung an der absoluten Festigkeitsgrenze, woraus hervorgeht, dass offene Fugen im Pfostenwerk der Fenster nie ganz unbedenklich sind, wenn nicht etwa durch starke durchlaufende Sturmstangen der Einsturz unmöglich gemacht wird. Da die Mängel der letzteren an anderer Stelle bereits beleuchtet sind, ist es ratsam, der Pfostenkonstruktion die gebührende Aufmerksamkeit zuzuwenden. Am zuverlässigsten werden immer die Fenster mit schwerem, beweglich über den Pfosten in Nuten eingesetztem Masswerk wirken, wie nochmals hervorzuheben ist. Wenn ausserdem die Pfosten, wie bei vielen frühgotischen Beispielen, aus einem einzigen festen Stein bestehen, der oben unter dem Masswerk durch Verankerung am Kippen verhindert ist, so ist damit natürlich jeder Gefahr am wirksamsten begegnet. Aber auch die übrigen Anordnungen werden sich bei achtsamer Ausführung als dauernd zuverlässig erweisen, wenn nicht etwa starke, das ganze Gefüge des Bauwerks auflockernde Verdrückungen eintreten.