



wachsen. In dem Masse als dieser Wasserschlag steiler wird, muss die Gestalt der in Fig. 289a gezeigten ähnlicher werden und völlig in dieselbe übergehen, sobald der Neigungswinkel des Wasserschlages  $90^{\circ}$  hat.

Die Konstruktion der Linien, in welchen diese Durchdringung geschieht, ist bereits an der Fig. 281 gezeigt worden. Die ganze Anlage ist sehr verschiedener Gestaltungen fähig, je nach dem Verhältnisse der Rippenprofile zum Kerne. So kann durch ein grösseres Mass des Kernes jedes Zusammenschneiden der benachbarten Rippen, wie es z. B. in Fig. 289 noch stattfindet, vermieden werden, während es umgekehrt bei einem kleinen Kerne in stärkerem Grade eintritt. So können ferner die Rippen, statt wie in Fig. 288 aus den Seitenflächen, aus den „Kanten“ des Körpers herauswachsen, desgleichen können sie senkrecht oder schiefwinkelig auf den Kern treffen (letzteres ist bei den Rippen *a* in Fig. 289 angenommen). Endlich kann die Vorderkante einer jeden Rippe in dem Umfange des Kernes liegen oder auch von demselben zurückgeschoben werden, so dass die betreffende Rippe sich oberhalb der Grundlinie, also mit einem leisen Knicke aus dem Kerne heraus-schneidet. Hierin aber liegt zugleich ein Mittel, der Kappe von vornherein eine beabsichtigte Richtung zu geben.

Soll z. B. die Kappe in Fig. 289 von Anfang an die beiden Rippen *a* und *d* unter gleichem Winkel schneiden, wie dies durch den Horizontalschnitt *ef* angedeutet ist, so würde man die eine oder andere der beiden Rippen soweit in den Kern zurückschieben können, bis diese Bedingung erreicht ist.

Das ganze System der Durchdringung, welches diese Gestaltungen ermög-licht, findet sich schon an den Werken der Frühgotik, wenn es auch in den angeführten Bildungen erst der mittleren Periode angehört. So finden sich Durchdringungen von Bogengliederungen mit den Strebepfeilerflächen, aus welchen sie hervorkommen, ferner Durchdringungen der Giebelprofile mit denselben Flächen, Durchdringungen der Bogenprofile miteinander schon an den ältesten Werken. Es scheint aber, dass man auf die Linien, in welchen die Durchdringung geschah, noch kein Gewicht legte, dieselben sich von selbst gestalten liess, während man in den späteren Perioden erst auf ihre reizvolle Wirkung aufmerksam geworden, dieselbe zu suchen, zu steigern und schliesslich zu übertreiben bemüht war. In dieser Übertreibung befangen, sah man über die wirklichen konstruktiven Vorteile der in den Figuren 287 bis 289 gegebenen Gestaltungen hinweg.

Man fing zuerst an, den polygonen Kern mit konkaven Seitenflächen zu bilden, auch wohl mit masswerkartig zurückgesetzten Feldern zu versehen, so dass die Rippen wie aus einem Fenster herauskamen. Oder man ersetzte das Polygon durch eine Gliederung, welche mit der des Rippenanfanges übereinstimmend, in das Verhältnis der Übereckstellung zu derselben trat, wie Fig. 290 im Grundrisse zeigt. Statt der regelmässigen Übereckstellung begnügte man sich auch wohl damit, dass die vortretenden Teile der Rippengliederung aus den zurücktretenden des Kernes hervorkamen und umgekehrt, dass also z. B. die Rundstäbe der Rippen mit den Kehlen des Kernes und jene des Kernes mit den Kehlen der Rippen eine Durchdringung bildeten. Ein derartiges Beispiel zeigt die Fig. 291, welche den Grundriss eines Pfeilers darstellt, auf welchem zwei stärkere Scheidebogen, zwei Gurt-

Durch-  
dringung der  
Wölb- und  
Pfeiler-  
gliederung.

rippen und zwei Kreuzrippen aufsetzen. Der obere schraffierte Teil von *a* bis *b* zeigt den Grundriss des Pfeilers, der Teil von *c* bis *h* den einer Gurt- und einer Kreuzrippe, und der Teil *ef* den des Scheidebogens. Fig. 291a stellt die Vorderansicht und Fig. 291b die Seitenansicht dieser willkürlichen Bildung dar. Die Entwicklung des Aufrisses aus dem Grundrisse ist im wesentlichen in dem bei Fig. 281 gezeigten Verfahren enthalten.

Durchdringungen dieser Art, nämlich der Rippen- und Bogengliederungen mit lotrecht ansteigenden Gliederungen, finden sich in den Werken der Spätgotik hauptsächlich in der Weise, dass die letztere Gliederung in ihrer Fortführung nach unten die Pfeiler bildet und dann auf einem Sockel aufläuft. Ein sehr reiches Beispiel bietet die Kirche St. Columba in Köln. Einfach ausgekragte Rippenanfänge wie Fig. 289 dagegen lassen sich nicht wohl in dieser Weise gestalten, weil die komplizierte Gliederung des Kernes sich auf eine gewisse Länge erstrecken muss, um verständlich zu werden.

So wie die Gestaltungen der Figuren 287 bis 289 zunächst durch die Benutzung der Masse des Werkstückes ermöglicht sind, so führt dasselbe Prinzip an manchen frühgotischen Werken auf mehr dekorative, aber im höchsten Grade reizvolle Bildungen. Um z. B. den Rippenanfang (Fig. 288a) nach den darin angegebenen Fugen *f*, *f'* auszuführen, wird das Werkstück *abf'f''* erfordert, von welchem der Teil *cf'f''* weggearbeitet werden muss. Es ladet aber diese Masse förmlich dazu ein, irgend welche Ornamente daraus zu bilden, und so die ursprüngliche Form des Werkstückes nochmals anklingen zu lassen. Sehr schöne Beispiele dieser Art zeigen die Rippenanfänge vom Chore der Stiftskirche in Wetter, an welchen oberhalb der Dienstkäpfele die Symbole der Evangelisten in der in Fig. 292 angegebenen Weise vor den Rippengliederungen vorspringen. Eine entsprechende Gestaltung liesse sich auch sehr wohl mit dem in Fig. 288a gezeigten Rippenanfänge in Verbindung bringen, wie z. B. Fig. 293 zeigt. Statt der hier angebrachten Laubbossen kann auch ein fortlaufendes Laubwerk auftreten, wodurch die Wirkung noch reicher wird. Ein überaus schönes Beispiel dieser Art zeigen die Pfeiler an dem Chorumgange der Kathedrale von Auxerre vor der Frauenkapelle (vergl. Figur bei VIOLLET-LE-DUC, Bd. IV, S. 149).

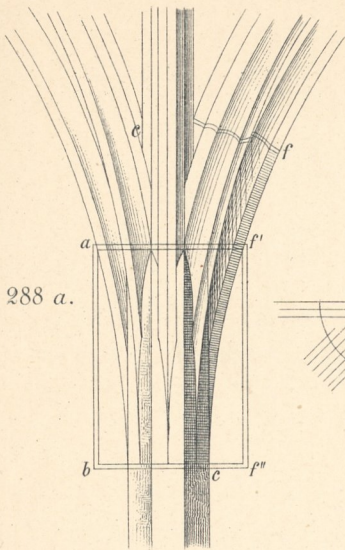
Der hier zu erwähnende wunderbare Kranz von Baldachinen und Figuren, welcher die Mittelschiffpfeiler des Mailänder Domes umzieht, trägt weniger den Charakter eines Wölbanges als den eines eingeschalteten selbständigen Vermittelungsgliedes.

## 9. Das Kappengewölbe.

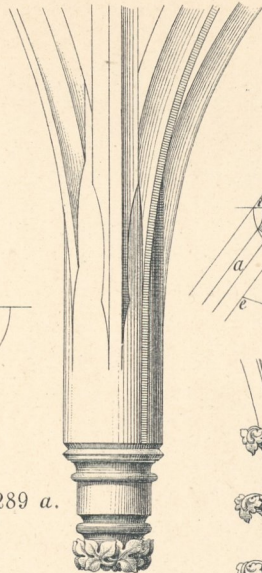
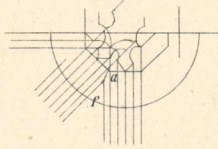
### Material.

Die Kappen werden entweder aus natürlichen oder aus künstlichen Steinen aufgeführt, erstere wechseln wesentlich nach den jeweiligen geognostischen Erzeugnissen der Gegend, die schweren und harten Massengesteine sind jedoch stets möglichst gemieden, ab und zu sind die verschiedenen Schiefer, besonders oft aber

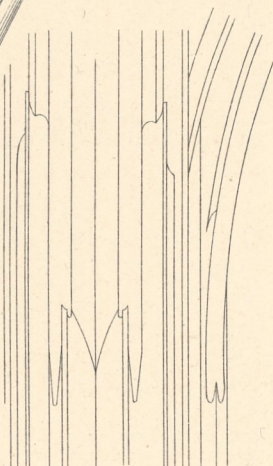
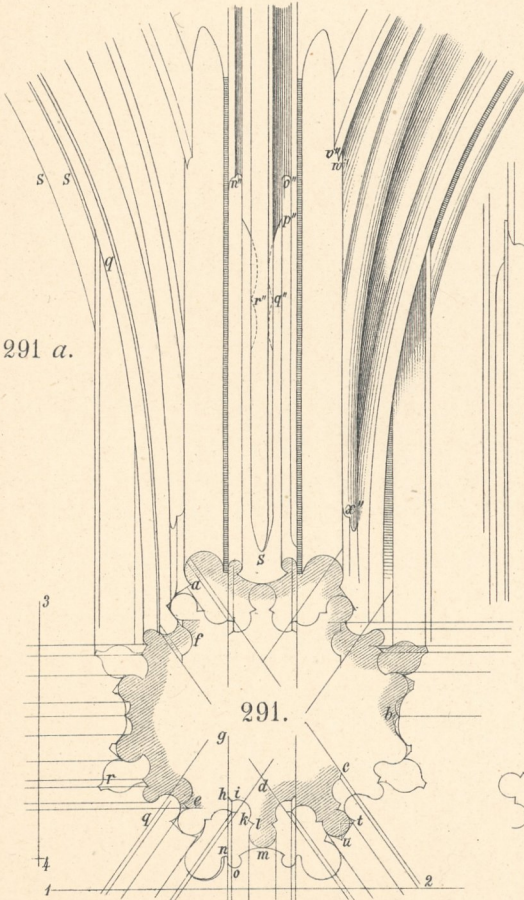
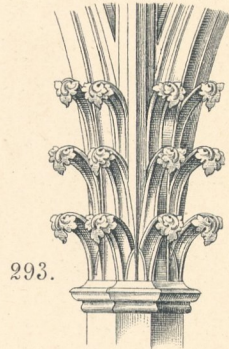
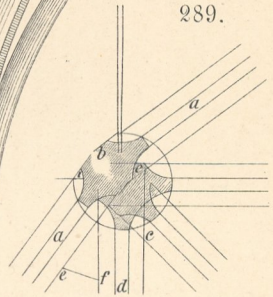
Anfänge über Pfeilern.



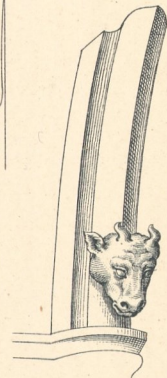
288.



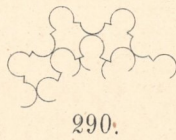
289.



292.



Stiftskirche zu Wetter.





der Kalk- und Sandstein verwendet. Ein ausnehmend hochgeschätztes Wölbmaterial bilden die leichten Tuffe, der Travertin Italiens, der Duckstein (Trass) vom Rhein und der weit verbreitete Kalktuff, der unter anderem bei Göttingen, Mühlhausen, in Franken, Oberbayern und bei Paris vorkommt. Gute Wölbsteine holte man im Mittelalter oft auf grosse Entfernung herbei. Mit dem Tuffsteine aus der Nähe von Andernach wurde auf dem Wasserwege ein förmlicher Handel nach Holland, Schleswig und Jütland betrieben. Der Tuff hat neben seinem geringen Gewichte die beachtenswerten Eigenschaften, dass an seiner rauhen Oberfläche der Mörtel gut haftet und dass der sehr poröse Stein die Räume warm und die Gewölbe trocken hält.

Jetzt ist das herrschende Wölbmaterial der Ziegelstein, der sich schon im Mittelalter für Wölbzwecke über seine engere Heimat hinaus Geltung verschaffte. Er ist leicht, porös und hat den Vorzug des gleichmässigen für Wölbzwecke gut geeigneten Formates; er begünstigt das freihändige Mauern und gestattet eine geringe Wölbstärke bei grossen Spannungen. Die übliche Dicke von ein halb Stein oder 12—15 cm kann für unbelastete Wölbungen bis 10 und mehr Meter Spannung verwendet werden, vorausgesetzt, dass Kappen und Rippen richtig geformt sind. Bei natürlichem Stein beträgt die Kappenstärke meist nicht unter 20 cm, nur bei besonders geeignetem Materiale ging man auf 9—15 cm herab. Eine wichtige Eigenschaft eines guten Wölbsteines ist immer ein geringes Gewicht, man hat aus diesem Grunde mit gutem Erfolge poröse Ziegelsteine dadurch gewonnen, dass man dem Thon in grosser Menge Sägespäne oder ähnliche brennbare Stoffe zusetzte, die nach dem Brennen, das sie erfolgreich unterstützen, entsprechende Hohlräume zurücklassen. Es ist in dieser Weise möglich, das Gewicht selbst bis auf die Hälfte herabzudrücken, ohne die Festigkeit in bedenklicher Weise zu mindern. Zu den Rippen, nötigenfalls auch zu den Kappenzwickeln, werden andere hartgebrannte Ziegel verwendet. Die neuerdings immer mehr beliebten durchlocherten Steine sind mit einer gewissen Vorsicht anzuwenden, jedenfalls sollte man es mit Rücksicht auf zu fürchtende Mörtelversackungen meiden, die Lochrichtung mit der Hauptdruckrichtung gleichlaufen zu lassen. Ein gutes Wölbmaterial sind bei mässig starker Beanspruchung auch die in der Nähe von Andernach am Rhein in 25×12×10 cm Grösse gefertigten leichten und porösen Schwemmsteine, die aber für Rippen nicht verwendet werden können.

Künstliche  
Steine.

Das durchgängige Bindemittel ist ein guter steifer Kalkmörtel; Zement, der jedenfalls nicht zu rasch binden darf, ist für die Kappen weniger angezeigt, er kann aber sehr wohl an stark gepressten Gewölbeanfängen, besonders bei solchen aus zugehauenen Ziegelsteinen gute Dienste leisten. Mit Rücksicht auf das verschiedene Setzen der beiden Mörtelarten sollte es gemieden werden, den Zementmörtel auf eine zu grosse Höhe auszudehnen, während seine Ausbreitung in seitlicher Richtung eine Druckübertragung auf grosse Grundfläche begünstigt. Sonst können für stark gepresste Teile, unter anderen für die Fugen der Werksteinrippen, Bleiplatten gute Verwendung finden. Weiteres siehe unten unter Ausföhrung.

Mörtel.

## Herstellungsweise.

Wird von Ausnahmebildungen als Topfgewölben und dergl. abgesehen, so sind drei verschiedene Herstellungsarten auseinander zu halten:

1. das Gussgewölbe auf Unterschalung,
2. schichtenweises Mauerwerk auf Schalung,
3. schichtenweises Mauerwerk ohne Schalung — das ist freihändige Mauerung.

Wenngleich alle drei Arten zeitweise nebeneinander vorkommen, so zeigt sich doch im allgemeinen ein Übergang von der ersten zur zweiten und von dieser wieder zur dritten.

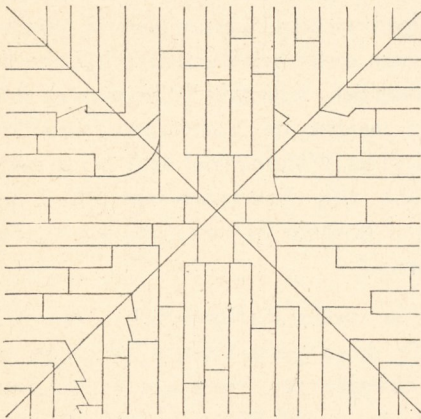
Gusswerk.

Das aus Steinbrocken und Mörtel gebildete Gusswerk lehnt sich an die römischen Überlieferungen an, es verliert aber für die Gewölbe an Bedeutung, sobald man mit Ernst darauf ausgeht, die Wölbstärke um jeden Preis einzuschränken. Für das Innere dicker Mauern behält das Mörtelwerk noch längere Zeit seine alte Beliebtheit.

Schichtenweises Wölben auf Lehrgerüst.

Das schichtenweis hergestellte Mauerwerk auf festem Lehrgerüste zeigt den grössten Wechsel in der Sorgfalt und Vollkommenheit der Ausführung. Man kann drei Abstufungen unterscheiden, zunächst ein unregelmässiges Mauerwerk in vollem Mörtel. Die Steine werden in roher Form mehr oder weniger schichtenweise auf die Schalung gepackt, entweder in ein volles Mörtelbett oder auch trocken mit nachherigem Vergiessen von oben. Auf einer vollkommeneren Stufe steht das regelmässige Bruchsteingewölbe, bei welchem mehr oder weniger ebenflächige und gleichartige Steine mit gleichmässigen Mörtelfiguren

294.



Theoderichgrab-Ravenna

schichtenweise aufgemauert werden. Als höchste Stufe ist das Werksteingewölbe aus scharfkantig zugerichteten Steinen mit regelmässigen Fugen zu betrachten. Je unvollkommener das Verfahren ist, um so mehr hängt die Festigkeit von der Güte des Mörtels ab, je entwickelter dagegen die Ausführung ist, um so mehr kann die Wölbstärke vermindert werden. Aus letzterem Grunde erkennt man auch hier wieder im ganzen eine Steigerung in der Güte der Technik; in romanischer Zeit finden wir rohere Bruchsteingewölbe von grosser Stärke, in gotischer Zeit besser gefügte und zugleich weit dünnere Kappen. Damit soll nicht gesagt sein, dass

nicht auch die frühromanischen und altchristlichen Abschnitte reich an besonders schön durchgeführten Werksteinwölbungen seien, als Beispiele sollen nur die Kuppeln der Kirchen im westlichen Frankreich, Périgueux usw. und das Kreuzgewölbe im unteren Raume des Theodorichgrabes zu Ravenna angeführt werden. Vom letzteren zeigt die Fig. 294 ein dem Scheitel benachbartes Stück,

das sehr schön die zur Anwendung gebrachte hakenartige Verzahnung der einzelnen Steine hervortreten lässt.

Als höchster Ausdruck einer vollendeten wenn auch uralten Technik (vergl. Freihändiges  
Wölben. vorn S. 4) erscheint die freihändige Wölbung, die aber an ein geeignetes Material gebunden ist, entweder an den Ziegelstein oder an kleine, leicht zurichtbare Werksteine, seien sie Kalk-, Sand- oder Tuffstein. Sie entwickelte sich daher zunächst in den Ziegelgebieten und Gegenden mit geeignetem Werksteine, unter letzteren ist Isle de France zu nennen, wo die Wölbstärke nach VIOLLET-LE-DUC in der Regel nur 10—12 cm betrug. Der Transport leichter Wölbmaterialien (s. oben S. 103) wurde in angemessenen Grenzen auch mit Rücksicht auf das freihändige Wölben getrieben. Die beim freihändigen Wölben zu wählende Lage der einzelnen Schichten wird weiter unten noch eine ausführlichere Besprechung erfahren.

Die Ziegelgewölbe waren bis etwa zur Mitte des XIII. Jahrhunderts einen Stein dick, sodann wurde fast allgemein eine Kappenstärke von  $\frac{1}{2}$  Stein oder 12—15 cm angenommen, man pflegte dieselbe für unbelastete Gewölbe bis 10 m noch als auskömmlich anzusehen, während für Gewölbe von 10—14 m eine durch besondere Ziegel erreichbare Kappenstärke von  $\frac{3}{4}$  Stein oder 18—22 cm angemessen ist. In der Gotik benutzte man im Ziegelgebiete sehr oft Steine von der Grösse eines Dreiviertelstückes z. B.  $22 \times 14 \times 8$  cm, die man im unteren Wölbdrittel als Köpfe bei dreiviertelsteiniger Kappenstärke, im oberen Teile aber als Läufer bei halbssteiniger Wölbstärke benutzte. Kleine stark busige unbelastete Kappen kann man noch weit dünner ausführen, mit 10 cm oder selbst ein  $\frac{1}{4}$  Stein Dicke. Vorausgesetzt, dass Kappen und Rippen statisch richtig in der Weise gebildet sind, dass die Kappen nur sich selbst haltende Füllflächen, die Rippen aber die eigentlichen Kraftträger sind, so würde nichts im Wege stehen, engmaschige Rippengewölbe von beliebiger Grösse mit  $\frac{1}{4}$  Stein starken Kappen zu schliessen. Eine Grenze der Spannweite würde durch die Haltbarkeit der Rippen, nicht diejenige der Kappen vorgezeichnet sein.

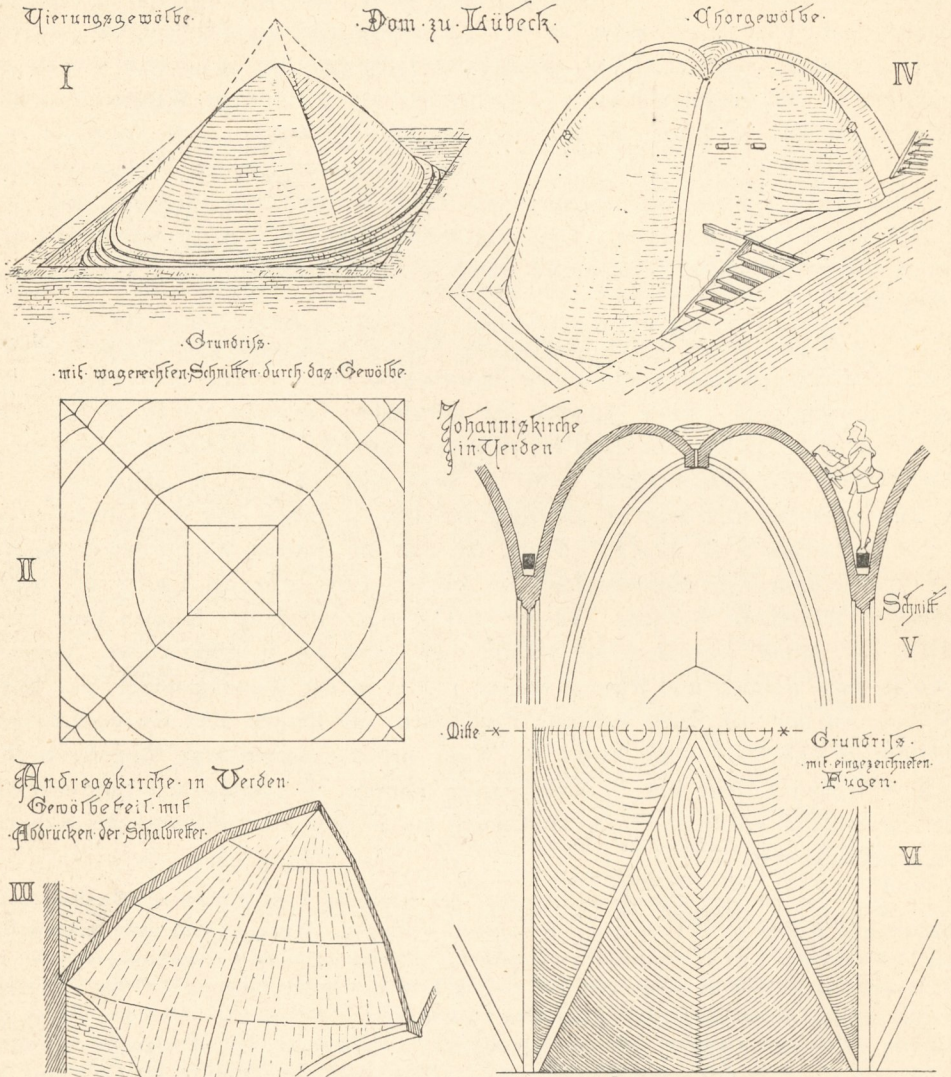
Es bietet ein ganz besonderes Interesse, den Übergang vom Wölben auf Schalung zum freihändigen Wölben im Gebiete des Ziegelbaues zu verfolgen. Wenn es auch nicht möglich ist, hier die einzelnen Entwicklungsstufen darzulegen, so sollen doch die Unterschiede, die sich in Wölbform und Wölbstärke aussprechen, an einigen Beispielen in den Skizzen 295 I bis V gezeigt werden. Fig. I zeigt die noch auf Schalung hergestellten überhöhten Gewölbe des Domes zu Lübeck, welche aus mehreren Schalen übereinander in ringförmigen und ansteigenden Schichten mindestens  $1\frac{1}{2}$  Stein dick gemauert sind. In Fig. II ist durch das Eintragen der Grundrisse in verschiedenen Höhen veranschaulicht, wie die unten vorspringenden Grate oben zu Kehlen werden, während der obere Teil des Gewölbes fast einer Pyramide ähnelt. Fig. III zeigt den Schnitt durch ähnliche Gewölbe in der Andreaskirche zu Verden, bei welchen die Schalbretter in der Richtung der Scheitellinie gelegt waren, jedoch einen gebogenen Linienzug machten, damit eine gekrümmte Scheitellinie erreicht würde.

Im Gegensatz dazu sind der Fig. I in Fig. IV gotische, freihändig hergestellte Chorgewölbe aus demselben Lübecker Dome und der Fig. III in Fig. V gotische Schiffgewölbe aus der Johanniskirche in Verden gegenübergestellt. Diese  $\frac{1}{2}$  Stein starken Gewölbe zeigen bei starker Überhöhung ringförmige Schichten. Da die Gewölbe der Johanniskirche in Verden weit länger als breit sind, ergibt sich im Grundrisse (Fig. VI) eine verschiedene Schichtenrichtung in den Kappen.



Bei Fig. V hat man trotz der starken Busung und Überhöhung die Gurte so tief liegen lassen, dass die Hauptbinderbalken durchgeführt werden konnten. Fig. IV und V können als Typen für die gotischen Ziegelgewölbe gelten.

•295•



Kappenform und Wölbdruck.

Es ist schon weiter oben (Seite 48) ausgeführt, dass die Übertragung des Wölbdruckes in den Kappen, abgesehen von Zufälligkeiten, sich nach der allgemeinen Kappenform, weniger nach den Kappenschichten richtet. Es konnte daher eine allgemeine Betrachtung über die zweckmässige Wölbform angestellt werden, ohne Rücksicht auf die Ausführung, die dabei gewonnenen Resultate gelten im gewissen Sinne selbst für Gussgewölbe aus zugfestem Mörtel.

Die viel verbreiteten Annahmen, dass Gussgewölbe jede beliebige Gestalt annehmen könnten, und dass von ihnen kein Widerlagsdruck ausgeübt würde, sind nur bedingungsweise zutreffend. Wenn das Gusswerk starke Zugkräfte völlig zuverlässig aufnehmen kann, aber auch nur in diesem Falle, dann gestattet es allerdings eine gewisse willkürliche Entfernung von der günstigsten Drucklinie. Je erheblicher aber die Abweichung wird, um so grösser werden auch die Zugkräfte, um so ausgedehnter muss aber auch der widerstehende Querschnitt werden, d. h. starke Abweichungen von der Drucklinie erfordern grössere Wölbstärke. Den geringsten Materialverbrauch wird ein Gussgewölbe stets aufzuweisen haben, wenn es der Form der Stützzlinie folgt. Ausserdem wird es dann durch zufällige Beeinträchtigung der Zugfestigkeit, wie durch Temperaturrisse, Setzungen, nicht im Bestande gefährdet.

Gewölbe  
mit Zug-  
spannungen.

Sehr bedenklich ist die Voraussetzung, dass Gussgewölbe keinen Schub liefern. Natürlich lassen sich gerade oder wölbartig gebogene Platten aus Gussmasse bilden und einem Balken gleich auflagern; sie sind zwar weniger zuverlässig als eine Steinplatte, können aber immerhin bei guter Ausführung als Ersatz dienen. Solche Platten sind dann aber auf Biegung als Balken zu berechnen, wobei sich eine entsprechend grössere Dicke ergibt, ganz besonders bei starker Belastung.

Man verwechselt gar zu gern Balken und Gewölbe. Der Balken (ebenso die gebogene Platte) ist an den Enden nicht gespannt, liefert keinen Seitenschub und wird auf Biegung (Druck und „Zug“) beansprucht. Das Gewölbe hat eingespannte Enden, liefert Seitenschub, wird dafür aber nicht auf Biegung, sondern auf Druck beansprucht und kann bedeutend dünner sein.

Würde man eine gebogene Platte genügender Stärke einer grossen Schale gleich fertigen stellen und nachher behutsam auf die Widerlager setzen, so wäre kein Schub zu erwarten, sonst aber kommen schon, solange der Mörtel noch weich ist, trotz der Lehrgerüste grosse Seitenpressungen auf die Widerlager, im vollen Umfange aber tritt der Schub auf, wenn aus irgend einem Grunde die so leicht eintretenden Risse das Gewölbe teilen. Da das Gusswerk meist sehr massig ist, überdies ein grosses spezifisches Gewicht zu haben pflegt, so werden die auftretenden Schubkräfte sogar ganz besonders gross; nicht ohne Grund haben die praktischen Römer ihre schweren Wölbungen durch ganz gewaltige Widerlager gestützt. Besonders zu warnen ist vor einer zu vertrauensseligen Verwendung weiter flacher Betondecken.

Bei den wenig elastischen Eigenschaften aller Stein- und Mörtelmaterialien ist es immer gewagt, mit ihrer ununterbrochenen Zugfestigkeit zu rechnen, will man sich nicht verhängnisvollen Zufälligkeiten aussetzen, so verzichtet man ganz darauf, sie auf Zug zu beanspruchen. Letzterer Standpunkt soll auch hier gewahrt bleiben und das um so mehr, als es sich darum handelt, Konstruktionen monumentaler Art auszuführen. Wer mit Aufmerksamkeit viele Hochbauten beobachtet, welche durch Jahrhunderte den Schwankungen der Stürme ausgesetzt waren, der wird wissen, wie übel der Baumeister beraten ist, der den Bestand eines Monumentalbaues von der Zugfestigkeit des Mörtels abhängig macht. Es wird ferner die Forderung aufzustellen sein, dass die Druckkräfte stets eine gesicherte Lage im Innern der Kappe haben, dass an keiner Stelle die Beanspruchung auf Druck das zulässige Mass überschreitet und dass unter der Einwirkung des Druckes kein Gleiten der einzelnen Teile aufeinander zu befürchten ist.

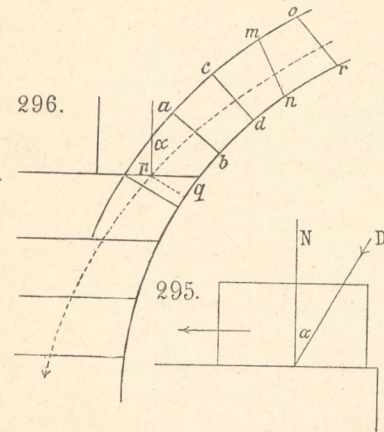
Gewölbe  
allein mit  
Druck-  
spannungen.

Über die günstigste Form der Kappen nach Massgabe der Druckkurven ist Seite 52 und folgende ausführlich gehandelt, bezüglich der Druckbeanspruchung kann noch nachgefügt werden, dass in den meisten Fällen der in unbelasteten Kappen auftretende Druck bei richtiger Form der Kappen weit unter der zulässigen Grenze bleibt. Als letztere kann man etwa annehmen für gewöhnliche gut gebrannte Ziegelsteine in Kalkmörtel 7 kg auf 1 qcm, für poröse Steine 3—5 kg, für die rheinischen Schwemmsteine 2—3 kg. Harten Ziegelsteinen oder Klinkern

in Zementmörtel kann man 11 oder auch wohl 14 kg Druck auf 1 qcm zumuten, natürlichen Steinen je nach ihrer Härte und dem verwendeten Mörtel 7 bis 20 kg und mehr.

Das Gleiten der Steine bedarf noch einer Erörterung. Wenn ein Stein auf seine Unterlage einen schräg gerichteten Druck  $D$  (Fig. 295) ausübt, so wird er unter Umständen auf dieser Unterlage fortgleiten und zwar um so leichter, je schräger der Druck wirkt, oder mit andern Worten je grösser der Winkel  $\alpha$  zwischen Druckrichtung und dem auf

die Unterfläche gefällten Lote  $N$  ist. Den Winkel  $\alpha$  nennt man den Reibungswinkel, er ist sehr verschieden nach der Oberflächenbeschaffenheit der sich berührenden Körper. Während zwei polierte Steine vielleicht schon bei einem Neigungswinkel von etwa  $10^\circ$  zum Gleiten gebracht werden, kann der Druck zweier rauher Steine einen Winkel von  $60-80^\circ$  zu der Senkrechten einnehmen, bevor ein Verschieben eintritt. Für die Gewölbe kommt selten ein Gleiten von Stein auf Stein in Frage, vielmehr handelt es sich hier um die Reibung zwischen Mörtel und Stein oder wohl ebenso häufig um die Verschiebung der Mörtelteile gegen-



einander. Neben der rauhen Oberfläche der Steine kommt es also ganz besonders auf die Beschaffenheit des Mörtels an, dessen Reibungswiderstand sich nach der Art seiner Bestandteile, seiner Mischung und Güte in den weitesten Grenzen bewegt. Nach stattgehabter Erhärtung wird bei mässig gutem Mörtel und mässig rauher Steinfläche der Reibungswinkel selten unter  $60$  oder  $70^\circ$  liegen. Sobald der Mörtel nur etwas angebunden hat, wird der Reibungswinkel über  $45^\circ$  betragen. Dagegen kann man bei dem noch weichen, breiartigen Mörtel von einem bestimmten Reibungswinkel überhaupt kaum sprechen; wenn er sehr dünnflüssig und beweglich ist, so kann schon bei weniger als  $20^\circ$  Neigung ein Gleiten eintreten, andererseits ermöglicht es ein guter, steifer Kalkmörtel, einen Ziegelstein an eine senkrechte Wand zu kleben.

Bei freihändig eingewölbten Kappen, deren Herstellung an die Verwendung eines steifen Mörtels gebunden ist, kann man gewöhnlich mit einem Reibungswinkel von etwa  $45^\circ$  rechnen. Andererseits sind Fälle vorgekommen, dass noch nicht geschlossene freihändige Kappenwölbungen durch ein sogleich nach dem Mauern vorgenommenes Hintergiessen mit dünnem Zemente zum Einsturze gebracht sind. Durch das Aufweichen der Mörtelfugen wird der Reibungswiderstand minimal geworden sein, eine statisch ungünstige Form der Kappen dürfte gleichzeitig vorgelegen haben.

Es empfiehlt sich, von den Maurern ein Wölben mit vollen Fugen zu verlangen, ohne dass auf der oberen Fläche des Gewölbes ein Übergiessen oder Überschlemmen mit Mörtel überhaupt gestattet wird. Ein solches kann nachträglich nach 8 oder 14 Tagen, soweit es überhaupt erforderlich ist, nachgeholt werden.

Die Gefahr des Gleitens erfordert eine Beachtung der Fugenrichtung im Durchschnitt und im Grundrisse. Stellt Fig. 296 den Durchschnitt durch eine Kappe oder irgend einen Bogen mit eingezeichneter Drucklinie dar, so darf zunächst der Winkel  $\alpha$  am Anfänger nicht grösser werden als der zulässige Reibungs-

Gleiten der  
Teile  
aufeinander.

Lage der  
Fugen mit  
Rücksicht auf  
das Gleiten.

winkel (weicher Mörtel vorausgesetzt). Sollte dieser Fall eintreten, so muss man die betreffende Fuge ganz oder wenigstens im vorderen Teile noch radial richten, wie es die punktierte Linie  $p q$  andeutet. Es dürfen ferner die Wölbungen  $a b, c d$  usw. nicht unter zu flachem Winkel von der Drucklinie getroffen werden. Diese Möglichkeit ist bei radialer Lage der Fugen in den uns angehenden Gewölben kaum zu fürchten, nach Massgabe des Reibungswinkels würden sogar Fugen zulässig sein, die nach oben etwas konvergieren wie  $m n$  und  $o r$ . Natürlich wird man derartige Unregelmässigkeiten meiden, da ein einzelner Stein durch Zufall ohne Spannung und ohne Mörtelbindung sein und herabstürzen könnte.

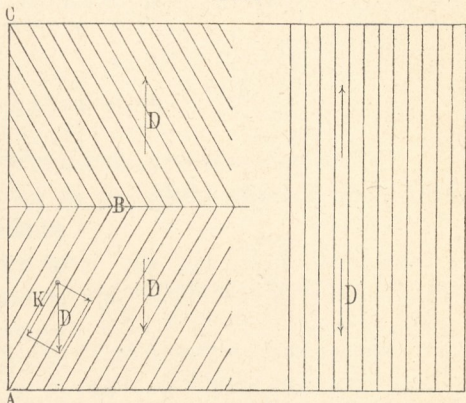
297.

Die gleiche Beachtung verdient die Reibung der im Grundrisse in Erscheinung tretenden Lagerfugen — die kurzen Stossfugen kommen weniger in Frage. Die Gefahr einer Verschiebung tritt am wenigsten ein, wenn die Schichten senkrecht zur Druckrichtung laufen, ihre Lage bleibt aber immer noch gesichert, wenn sie von dieser günstigsten Richtung um weniger als den Reibungswinkel abweichen.

Man darf annehmen, dass der Wölbdruck nicht beeinflusst wird, so lange die Schichtenrichtung um weniger als den Reibungswinkel vom Lote zur Druckrichtung abweicht. (Das heisst mit anderen Worten, solange der Winkel zwischen Druck- und Schichtenrichtung nicht flacher ist als  $90^\circ$  weniger den Reibungswinkel.) In diesen Grenzen ist es ganz gleichgültig, wie auch immer die Schichten laufen mögen (vergl. darüber die Ausführungen S. 52 usw.).

Würde bei einer tonnenförmigen Kappe der Mörtel beim Mauern oder wenigstens beim Ausrüsten so steif sein, dass der Reibungswinkel  $45^\circ$  wäre, so dürfte demnach der Winkel zwischen den Schichten und der Wölbachse höchstens diesen Wert haben. Läge nun wie in Fig. 297 aber ein grösserer Winkel, z. B.  $60^\circ$  vor, so würde eine Bewegung der Schichten gegeneinander oder soweit diese verhindert ist, wenigstens eine Druckänderung bezüglich der Widerlager eintreten. Der Teil  $ABC$  der Schichten würde z. B. die Stirnmauer belasten und zwar mit einer aus dem Drucke  $D$  abgeleiteten Seitenkraft  $K$ , vermindert um den Reibungswiderstand. Die Kraft würde allerdings nicht sehr gross ausfallen, der Hauptschub bliebe immer den eigentlichen Widerlagern. Wenn das Gewölbe noch weiter erhärtet wäre, derart, dass der Reibungswinkel über  $60^\circ$  betrüge, so würden die Stirnmauern nun sogar sich durch Setzen oder Ausweichen entlasten können, worauf der ganze Schub wieder allein durch die unteren Widerlager aufgenommen werden müsste.

Die Möglichkeit, dass die Schichtenlage eine abweichende Druckverteilung erzeugt, wird am leichtesten vorliegen, solange der Mörtel noch weich ist, will man daher sicher gehen, dass die Druckübertragung wirklich nach der Wölbform vor sich geht, so ist es gut die Schichten von ihrer günstigsten Richtung senkrecht zum Drucke nicht um mehr als  $45^\circ$  abweichen zu lassen (bei der Forderung grösster Sicherheit event. auch nur  $30^\circ$ ). Bei kuppelartigen Wölbungen, welche Druck in der Meridian- und der Ringrichtung bekommen, ist die Schichtenrichtung noch viel weniger, meist gar nicht beschränkt.



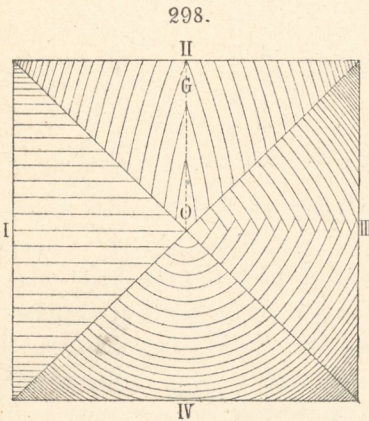
Eine Schichtenlage bedarf noch besonderer Erwähnung, es ist das die bei den Byzantinern, aber auch im weiteren Mittelalter geübte, neuerdings wieder durch MOLLER zu Ehren gebrachte Lage senkrecht zum Scheitel (Fig. 297 rechts). Sie erleichtert unter manchen Bedingungen das freihändige Mauern. Bei ihr fällt die Richtung von Schicht und Druck zusammen, es überträgt jede Schicht ihren Druckanteil für sich auf das Widerlager, hier kann natürlich auch keine Abweichung von der richtigen Druckverteilung auftreten.

Bei den meisten in der Praxis üblichen Schichtenlagen ist eine Beeinflussung der Druckrichtung durch die Richtung der Schichten nicht vor auszusetzen.

### Anordnung der Schichten.

Schichten-  
lage bei den  
Alten.

Dürfen wir annehmen, dass die Schichtenanordnung für die Druckübertragung meist ohne Einfluss bleibt, so ist sie desto wichtiger für die Bequemlichkeit der Ausführung. Es sind daher in dieser Richtung in früher und neuerer Zeit mannigfache Versuche gemacht. Sofern die Alten ihre Gewölbe auf voller Schalung herstellten, war für sie die Schichtenlage von geringerem Werte, wölbte man aber freihändig, so gelangte sie sofort zu besonderer Bedeutung.

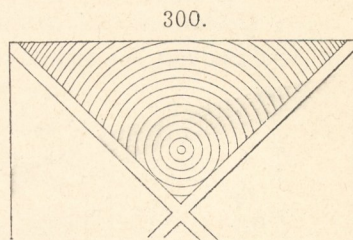
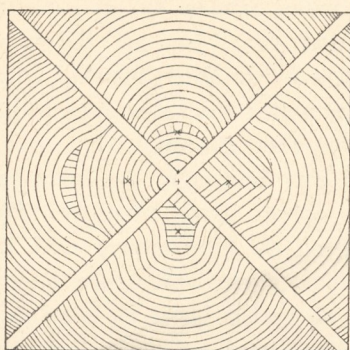


Gewöhnlich bildeten die Fugen bei den Tonnengewölben sowohl wie bei den aus Tonnen zusammengesetzten Kreuzgewölben gerade Linien, die bei den frühromanischen Gewölben sowohl „wagerecht“, als auch „gleichlaufend mit der Tonnenrichtung“ waren. (Kappe I in Fig. 298.) Als

man zu überhöhten Wölbungen überging, konnten die Fugen nicht mehr beide Eigenschaften zugleich haben. Blieben sie gleichlaufend mit der Tonnenachse, so stiegen sie nach der Mitte zu an; blieben sie dagegen wagerecht, so nahmen sie eine andere Richtung im Grundrisse ein. (II in Fig. 298.) Die erste Art, also die gleiche Richtung mit der Kappenachse, wurde in vielen Gebieten von Deutschland und im östlichen Frankreich gepflegt, während man in dem derzeit englischen Westfrankreich — jedenfalls im Anschlusse an die dort üblichen in horizontalen Ringen gewölbten Kuppelgewölbe — den zweiten Weg einschlug. Denselben verfolgt man auch in der Normandie und in England, er führt hier zu der Aufnahme der Scheitelrippe und bildet die Grundlage für die bei den späteren Netz- und Fächergewölben übliche Herstellungsart. Die mehr oder weniger wagerechten Schichten träten aber auch früh in andere Gegenden über. Von besonderem Einflusse auf die Richtung der Schichten wurde das freihändige Mauern, das in den Gebieten mit leicht zu bearbeitenden kleinen Werksteinen, am allgemeinsten aber in den Backsteingegenden zur Herrschaft gelangte. Das freihändige Aufmauern erforderte krumme und kurze Schichten, die man zu erreichen suchte, so gut es ging.

Dass man sich beim freihändigen Mauern nicht gar zu sehr an eine vorher ersonnene Schablone hielt, sondern sich zu helfen suchte, wie es am besten möglich war, zeigen in interessanter Weise die Gewölbe am Domkreuzgange zu Riga, die dem XIII. Jahrhundert angehören.

Es finden sich unmittelbar nebeneinander die in Fig. 299 skizzierten Anordnungen. Die Kappen sind, wiewohl Stirn- und Kreuzbogen spitz sind, kuppelartige Flächen, deren Gipfel-punkte seitwärts von der Wölbmitte an der durch ein Kreuz bezeichneten Stelle liegen. Die ringförmigen Schichten liegen unge-



fähr horizontal, der Schluss der Kappen hat fast in jedem Felde eine andere Lösung gefunden, da die in der Fig. 300 gezeichnete regelrechte Ringanordnung sich am Kappengipfel schlecht durchführen lässt.

Es mögen nun die wichtigsten Schichtenlagen etwas näher besprochen werden.

1. Schichten gleichlaufend mit der Firstlinie blieben in den Gegenden, wo man auf grössere Bruchsteine angewiesen war, bis in unser Jahrhundert üblich, sie waren fast typisch für die Gewölbe ohne Busung auf Schalung. Am liebsten benutzte man die leichten Tuffsteine; an der Alexandrikirche zu Einbeck sind solche bis 60 cm Länge und 20 oder 30 cm Dicke verwendet.

1. Schichten  
gleichlaufend  
mit der  
Firstlinie

Ein freihändiges Mauern solcher Gewölbe würde nur ausführbar sein für sehr geringe Abmessungen, denn die oberen Schichten würden gleich scheinrechten Bogen sich halten müssen, was bei ihrer grossen Länge nicht wohl möglich ist. Bei hohen, spitzbogigen Kappen wird diese Schwierigkeit geringer, immerhin wird man aber für die oberen Schichten eine sichere Unterstützung durch Latten oder Schalbretter kaum entbehren können, meist wird man die ganze Kappe einschalen.

Der einfachste Fall liegt vor, wenn das Gewölbe weder eine Überhöhung noch eine Busung hat, die Fugen laufen parallel dem Firste und sind geradlinig wie beim einfachen Tonnengewölbe, es ist dabei ohne Einfluss, ob die Kappen nach einem runden oder spitzen Querschnitte geformt sind.

Kappen ohne  
Busung und  
Über-  
höhung.

Bei der Ausführung

301.

in Ziegel- oder Bruch-

stein wird man in der

Regel vorher keine Ein-

teilung in Schichten vornehmen, der

Maurer fängt unten mit horizontalen

Schichten an und schreitet fort, bis sich die-

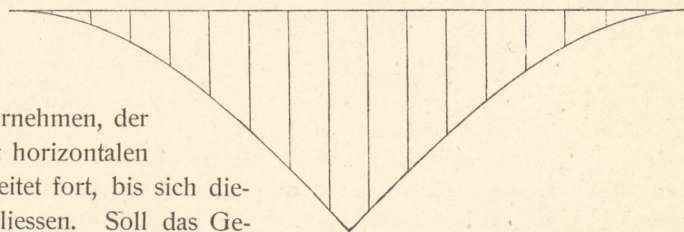
selben am Scheitel schliessen. Soll das Ge-

wölbe dagegen sauber in Werkstein ausgeführt werden, so kann man die Fläche

abwickeln und in der Abwicklung die Einteilung vornehmen, Fig. 301. Jede Schicht

läuft geradlinig und in gleichmässiger Breite vom Schildbogen herüber. In Fig. 302 I

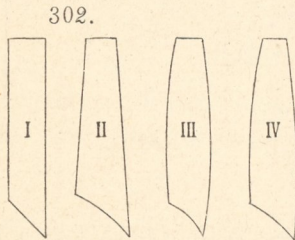
ist eine Schicht ausgetragen. Unbedeutende Abweichungen entstehen nur insoweit,



als die Projektion des Kreuzbogens von dem Schildbogen abweicht, z. B. bei spitzem Schildbogen und halbkreisförmigen Grate.

Kappen mit  
Busung und  
Über-  
höhung.

Wenn ein überhöhtes Gewölbe vorliegt mit geradlinig steigendem Scheitel, so bekommt eine ausgetragene Schicht 302 II keine gleichmässige Breite mehr, sie erweitert sich vielmehr nach dem Grate zu. Bei busigen nicht überhöhten Gewölben wird die Schicht in der Mitte bauchig erbreitert (Fig. 302 III), eine Abwicklung der allseits gekrümmten Fläche ist nun nicht mehr möglich; ist die Kappe aber gleichzeitig überhöht und busig, so wird eine Schicht in der Mitte bauchig und zugleich nach dem einen Ende erbreitert. Fig. 302 IV.



Wenn die Überhöhung oder Busung unbedeutend ist, so sind auch diese Abweichungen für die einzelne Schicht so gering, dass sie sich durch die Fuge leicht ausgleichen lassen. Treten sie stärker hervor, so muss man bei Ziegelverwendung einen Teil der Steine etwas behauen oder von Zeit zu Zeit durch eine keilartige Schicht einen Ausgleich vornehmen. Bruchsteine wird man nach der nötigen Dicke aussuchen können. Werksteine müssen bei sauberer Ausführung entsprechend zugerichtet werden, was der Einfachheit wegen durch Einpassen oben auf der Rüstung geschieht.

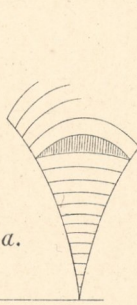
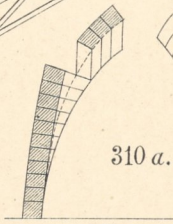
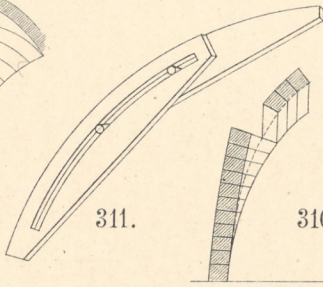
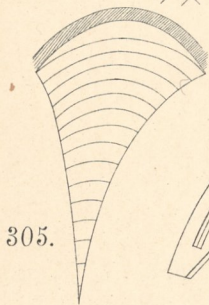
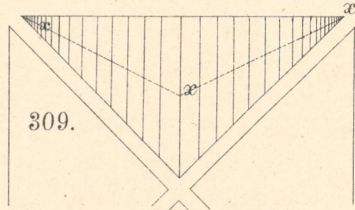
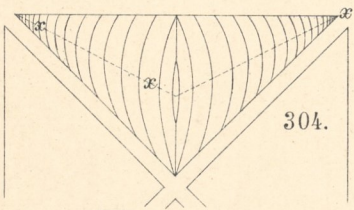
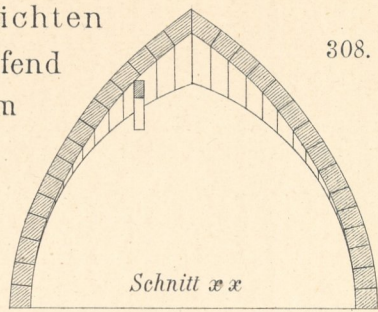
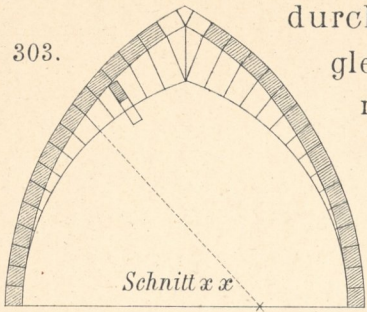
Spitze busige  
Kappen.

Eine besondere Unregelmässigkeit ergibt sich bei spitzen busigen Kappen oben am Scheitel. Werden die Schichten radial zum Bogen gesetzt, so bleibt, wie Fig. 303 im Schnitte und Fig. 304 im Grundrisse zeigt, oben ein linsenförmiger Spalt, der durch zugehauene Steine auszufüllen ist. Seine Schliessung ist an älteren Gewölben zuweilen in ziemlich unregelmässiger Weise bewirkt; mit Ziegelsteinen ist sie immer noch leichter zu vollführen als mit Bruchsteinen. Bei dieser Wölbart mit radialen Fugen, die meist freihändig bewirkt wird, zeigen sich die Fugen im Grundrisse als gekrümmte Linien, siehe Fig. 304. Fig. 305 zeigt die innere Ansicht einer Kappe und in Fig. 306 ist die Gestalt einer ergänzten Schicht dargestellt, dabei ist zum leichteren Verständnisse angenommen, dass die Kappe ein Stück einer Kugelfläche bildet.

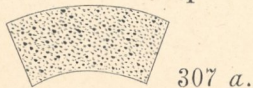
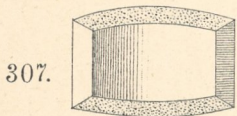
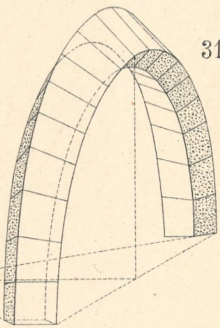
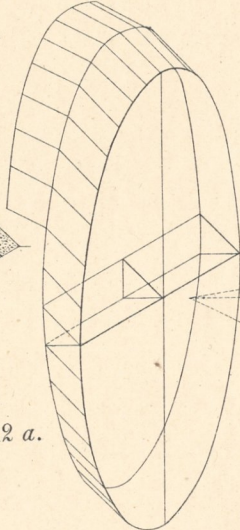
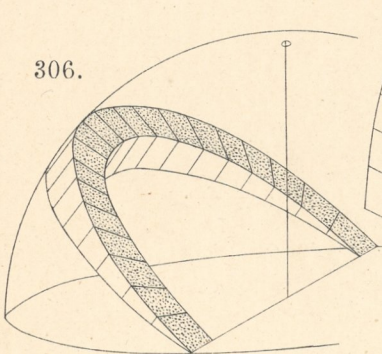
Ein wesentlich anderes Verfahren giebt VIOLLET-LE-DUC an in seinem *dictionnaire raisonné de l'architecture* etc. Bd. IV. S. 105. Danach erscheinen die Fugen im Grundrisse als Gerade parallel der Scheitellinie. Die Lagerfugen sind nicht wie vorher radial gerichtete Ebenen, sondern gebogene kegelartige Flächen. Zum Vergleich ist diese Wölbart in den Figuren 308 bis 312 der vorigen gegenübergestellt.

Wird jede Schicht bis zu ihrem Schluss durch einen verschieblichen Lehrbogen unterstützt, der am besten jedesmal unter der oberen Kante der zu setzenden Schicht aufgestellt wird, so wird dieser Lehrbogen bei dem ersteren Verfahren radial gerichtet sein (Fig. 303), bei dem Verfahren nach VIOLLET dagegen jedesmal senkrecht (Fig. 308). Da die Schichtlänge von unten nach oben beständig wächst, empfiehlt VIOLLET-LE-DUC zur Unterstützung zwei nebeneinander mittels Nut und Zapfen verschiebliche Bogenbretter, die sich durch Ausziehen beliebig verlängern lassen (Fig. 311). Wenn der Maurer nur darauf achtet, dass die Seitenfläche dieser Lehre jedesmal genau senkrecht steht, so wird ihm durch dieselbe die Fuge genau vorgezeichnet, er wird in jeder Schicht einen kleinen Ausgleich vornehmen, da die Enden um ein geringes schmaler sind, als die Mitte. So wird der Maurer ohne sein Zuthun veranlasst, jeder Schicht eine ihr zukommende Form zu geben,

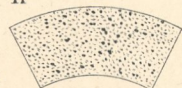
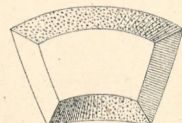
Einwölbung spitzer busiger Kappen  
 durch Schichten  
 gleichlaufend  
 mit dem  
 First.



310.



I



II



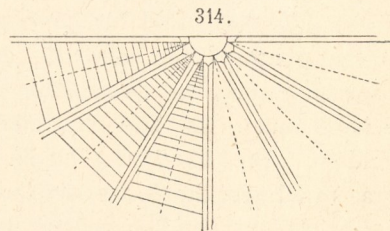


bis er in der Mitte ankommt, wo sich ein regelrechter Schluss des Scheitels von selbst ergibt. Es braucht dem Maurer nichts weiter gegeben zu werden, als die Pfeilhöhe für die längste Schicht im Scheitel oder richtiger der Halbmesser seiner Lehre, alles andere ergibt sich dann von selbst. Es wird am angegebenen Orte empfohlen, das untere Drittel wie eine gewöhnliche Mauer ohne Lehre aufzuführen, wobei der Maurer sich den jeder Schicht gebührenden Stich auf der Lehre entnimmt, indem er einen Faden von Schichtlänge als Sehne auf den Bogen legt. Es ist dieser Erklärung eine Skizze beigegeben, welche die Schichten im unteren Drittel zeigt, dieselben haben keine Biegung nach oben, scheinen vielmehr ihren Stich seitwärts zu haben. VIOLLET begeht hier eine kleine Ungenauigkeit; wenn in der von ihm angegebenen Weise das untere Drittel gemauert würde, so entstände da, wo die Verwendung des Lehrbogens beginnt, eine linsenartige Öffnung und ein Knick in der Kappenrichtung, wie Fig. 310 a in Schnitt und Ansicht zeigt. Um diesen Mangel auszugleichen, würden hier kleine unregelmässige Übergänge nötig werden, die lästig und hässlich werden können. Es dürfte deshalb richtiger sein, auch die unteren Schichten, selbst wenn sie ohne Lehrbogen gewölbt werden, schon etwas nach oben zu krümmen, wie es auch in der Ansicht 310 angenommen ist.

Vergleicht man die beiden Wölbverfahren, so ist unverkennbar beim zweiten ein Vorteil darin zu sehen, dass die richtige Stellung des Lehrbogens sich leicht überwachen lässt, und dass sich eine regelmässige Lösung für den Scheitel ergibt. Ungünstiger ist dagegen die Gestaltung der Lagerfuge, die beim ersten Verfahren in einer Ebene liegt, hier aber eine komplizierte, kegelförmig gebogene Fläche ist. Die Mantelflächen der Kappen sind auch voneinander abweichend, bei der ersten Konstruktion ergibt sich eine am Fuss und Scheitel etwa gleich gekrümmte kugelförmige Fläche. Die Mantel- oder Leibungsfläche einer jeden einzelnen Schicht hat im zweiten Falle annähernd die Gestalt eines schräg steigenden Cylinders (Fig. 312 a). Es stellt sich eine Schicht nach Fig. 312 dar. Würde man genau hergestellte Werksteine verwenden, so entstände beim ersten Verfahren eine einfachere Form (Fig. 307), beim zweiten die unbequemere Form Fig. 313. Der Werkstein 307 hat nur zwei gekrümmte Flächen, nämlich die Leibungen, die Lager- und Stossflächen sind eben; der Werkstein 313 hat nur ebene Stossflächen, während Leibungen und Lager gebogen sind. Wenngleich keine genau zugerichteten Steine verwendet zu werden pflegen, wird die letztere kompliziertere Form sich auch beim Bruchsteine und selbst dem Ziegelsteine immer noch in der Schwierigkeit aussprechen, dem Steine seine richtige Lage anzuweisen.

2. Horizontal laufende Kappenschichten treten besonders auf an den freihändig aufgeführten Gewölben. Die parallel mit dem First laufenden Schichten haben den Mangel, dass die recht langen Scheitelschichten ein freihändiges Mauern etwas erschweren. Günstiger sind schräg laufende Schichten, wie sie der Grundriss 298 III zeigt, sie können eine verschiedene Richtung erhalten. Besondere Beachtung erfordert die Lage, welche sich bildet, wenn alle Schichten horizontal laufen, oder richtiger wenn bei jeder Schicht die Endpunkte in gleicher Höhe liegen. Auf gewöhnliche Kreuzgewölbe ohne Überhöhung hat diese Änderung gar keinen Einfluss, da die Schichten dem Scheitel bei horizontaler Lage gleichlaufend sind (siehe 298 Kappe I), bei geringer Überhöhung ist auch kein grosser Vorteil erreicht, (Kappe II), die Schichten sind oben nur wenig kürzer, verlangen aber in der Scheitellinie *OG* eine lästige spitzwinkelige Verschränkung. Erst bei starker Überhöhung werden die horizontalen Schichten für ein einfaches Kreuzgewölbe

günstiger, die Verschränkung wird mehr rechtwinkelig, III in Fig. 288. Es lässt sich sogar eine Verschränkung nach Kappe IV ganz vermeiden, wie es die Gewölbe zu Riga — Fig. 299 zeigen. Trotzdem hier Schild und Gratabogen spitz



2. Horizontal laufende Kappenschichten.

sind, ist keine Scheitelkante vorhanden, die Schichten laufen gleich den horizontalen Ringen einer Kuppel in stetiger Krümmung über den Scheitel fort, eine Anordnung, die beim Fehlen der Scheitelrippe als besonders günstig zu bezeichnen und auch für Neuausführungen stark überhöhter Gewölbe sehr zu empfehlen ist. Ist die Busung mässig, so werden die Ringe etwa konzentrisch um die Wölbmitte laufen, ist dieselbe aber sehr hoch gezogen, so wird man in der Nähe ihres Wipfels von der horizontalen Schichtführung etwas abweichen können, wie es die Rigaer Gewölbe bereits zeigen.

Die Überhöhung der norddeutschen Ziegelgewölbe ist oft ganz überraschend gross, Fig. 295 IV zeigt eine Aufsicht auf die Gewölbe des Domes zu Lübeck.

Noch mehr als für die einfachen Kreuzgewölbe haben die Horizontalschichten Wert für die reichen Fächer und Netzgewölbe, besonders wenn deren Bogen sämtlich mit gleichem Halbmesser geschlagen sind. In diesem Falle stehen im Grundrisse die Schichten senkrecht zu der Winkelhalbierenden; im Grundrisse und Aufrisse ergibt sich eine gleich regelmässige Bildung (vergl. 314), weshalb diese Schichtenlage für derartige Wölbformen allgemein üblich wurde.

Bei der meist geringen Entfernung zwischen den Rippen der Fächergewölbe können selbst Kappen ohne busige Schichten freihändig eingemauert werden. Die unteren Schichten liegen bei ihrer geringen Neigung sicher aufeinander, die oberen nehmen immer mehr die Eigenschaft von scheinrechten Bogen an. Sind die oberen Schichten sehr kurz, so werden sie sich zuverlässig zwischen den Rippen halten, werden sie aber länger, so empfiehlt es sich, von Zeit zu Zeit eine unterstützende Latte unter einer Schicht zu lassen, bis das Feld geschlossen ist. Solche Latten verringern einstweilen den Schub und können im Notfall als Spreizen wirken, wenn der vor Wölbabschluss bedeutende Schub der scheinrechten Schichten sich nicht genügend im Gleichgewichte halten sollte. Die letzten Schichten sind recht fest zwischen die vorhergehenden einzusetzen, so dass sie auf alle anderen Schichten eine seitliche Verspannung übertragen können. Werden nun die unterstützenden Latten und die Lehrbogen unter den Rippen fortgenommen, so werden, falls der Mörtel noch eine geringe Dehnbarkeit besitzt, die Druckspannungen sich umsetzen, die Wirkung der scheinrechten Bogen tritt mehr zurück, dafür verspannt sich die Kappe von Schicht zu Schicht. Sie hat die Form eines Ausschnittes aus einem Tonnengewölbe und wirkt auch dem entsprechend. Ein geringes Durchschlagen der scheinrechten Schicht nach unten ist zu erwarten.

Natürlich haben auch hier busige Schichten ihre Vorzüge vor allen Dingen in den oberen Teilen der Kappen, sie bewirken eine andere Druckübertragung auf die Rippen, verringern aber ganz besonders während des Einwölbens den soeben besprochenen Seitenschub der Einzelschichten gegen die Rippen. Für eine saubere Ausführung wird auch hier der ausziehbare Lehrbogen gute Dienste leisten können, meist wird man aber von seiner Verwendung absehen und die Schichten völlig frei hinsetzen.

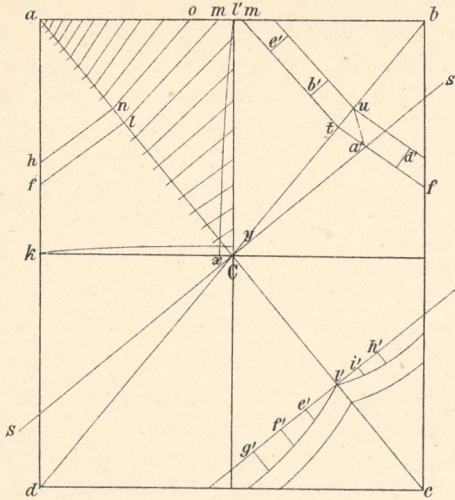
3. Schichten  
senkrecht  
zum  
Kreuzgrate.

3. Schichten, deren Fugenebene senkrecht zum Diagonalbogen steht (Fig. 315), sind für gewöhnliche quadratische oder nahezu quadratische Gewölbe günstig. Sie haben für die Ausführung den doppelten Vorteil, dass ihre Lagerfugen in einer Ebene über den Graten fortlaufen und dass sie sich in dem Scheitel unter 90 Grad verschränken, letzteres allerdings nur bei quadratischen Feldern. Die Ebene der Fugen steht senkrecht zu der Vertikalebene des Kreuzgrates und geht durch den Mittelpunkt des letzteren. Im Diagonalschnitte (Fig. 315a) erscheint daher die Fugenebene als eine gerade radial gerichtete Linie. Die einzelne Schicht kann geradlinig sein oder busig.

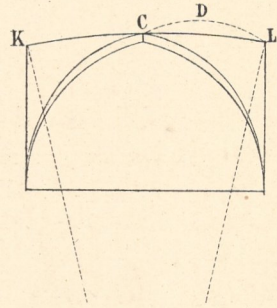
In Deutschland ist diese Schichtlage in der letzten Zeit ziemlich verbreitet gewesen, wir wollen daher in Fig. 315 bis 316 die graphische Darstellung der-

Schichten senkrecht zum Gratbogen.

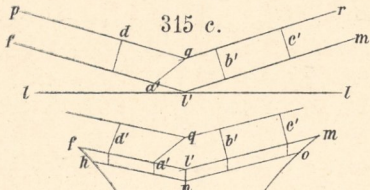
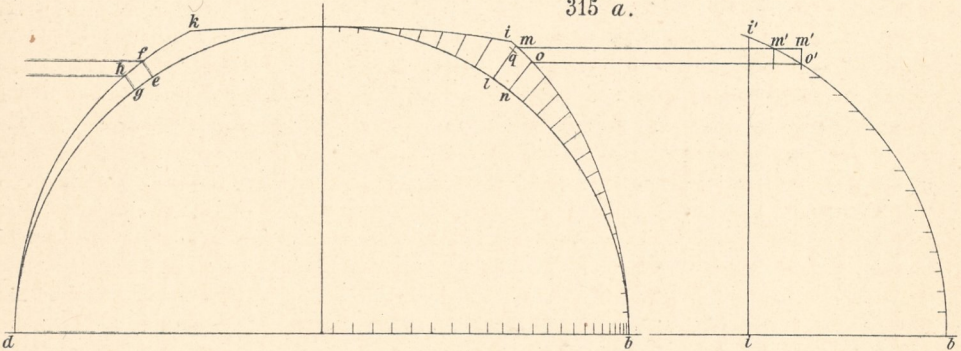
315.



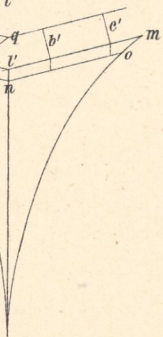
316.



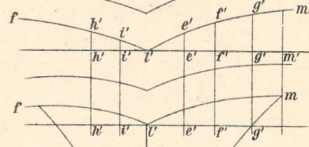
315 a.



315 b.



315 d.



315 e.

×  
c'

×  
c'





selben zeigen. Obwohl die Ausführung nicht nach einer derartigen Zeichnung, sondern nach dem Auge eines geübten Maurers geschieht und daher immer einige Abweichungen und Unregelmässigkeiten zeigt, so folgt sie doch dem daraus ersichtlichen Prinzip.

In Fig. 315 ist der Grundriss eines rippenlosen rechteckigen Kreuzgewölbes, in Fig. 315a der Diagonalschnitt gezeichnet, der den hier halbkreisförmigen Kreuzgrat in wirklicher Ansicht, die beiden Stirnbogen aber in Projektion zeigt, die wirkliche Gestalt einer Stirnbogenhälfte ist seitwärts angegeben. Fig. 316 stellt den Querschnitt in kleinerem Massstabe dar, die Scheitelpunkte der Seitenbogen  $K$  und  $L$  können gleiche oder verschiedene Höhenlage mit dem Schlusspunkte  $C$  haben, die verbindenden Scheitellinien  $KC$  und  $CL$  können geradlinig oder gebust sein. Liegt die Wölbmitte höher als die Stirnbogenscheitel, so legt man am einfachsten durch die drei Punkte  $KCL$  ein Kreisstück als Firstlinie. Bei sehr stark busigen Schichten nimmt man auch die Scheitellinie stärker busig an (siehe  $CDL$ ), damit sie die Last der hier zu einem Grate zusammenschneidenden Schichten sicher übertragen kann. Bei entsprechenden Verhältnissen zwischen Busung und Überhöhung kann die Scheitellinie als Grat oder Kehle stärker hervortreten. In solchen Fällen ist die Verwendung einer besonderen Scheitelrippe unter Umständen für die Ausführung bequem und aus statischen Gründen geboten, sie verdankt ihre Entstehung überhaupt der Anwendung von Schrägschichten.

Handelt es sich darum, die Wölbungen zu zeichnen, so wird auf dem Diagonalbogen die Schichtenteilung vorgenommen (z. B. nach Ziegelschichten), durch die Teilpunkte  $l, n$  usw. werden Radien nach dem Mittelpunkte gelegt. Die Verlängerung  $lm$  und  $no$  dieser Radien bezeichnet die Ansicht der Fugen, die auch, wenn sie busig sind, als gerade Linien erscheinen. Die Teilpunkte auf dem nebengezeichneten (wirklichen) Schildbogen sind leicht durch wagerechtes Hinüberziehen der Punkte  $mo$  usw. nach  $m_1, o_1$  zu finden.

Die Teilpunkte der beiden Bogen können leicht in den Grundriss getragen werden (siehe  $n, om$  usw. in Fig. 315). Werden nun je zwei entsprechende Punkte verbunden, so entstehen die Grundrisse der Fugen  $lm, no$  usw. Sind die Fugen in Wirklichkeit gerade Linien, so sind sie es auch im Grundrisse, sind sie gebust, so werden sie auch im Grundrisse eine schwache Krümmung erhalten, die man durch Projektion einzelner Punkte ermitteln kann. Das Einzeichnen solcher gekrümmter Fugen soll nicht weiter behandelt werden, da es auf einfache Aufgaben der darstellenden Geometrie hinausläuft und für die Praxis wertlos ist.

Wenn erforderlich, so lässt sich auch unschwer die Projektion des Gewölbeanfanges auf eine Ebene senkrecht zur Diagonale zeichnen, was in Fig. 315b geschehen ist. Aus dieser findet man den niedergeschlagenen Grundriss einer Schicht Fig. 315c, welcher den Winkel an dem Grate zeigt und das Einzeichnen der Stossfugen gestattet. Sind die Schichten busig, so wird die Krümmung in diesen niedergeschlagenen Grundriss eingetragen, Fig. 315d, von hier kann sie in die Ansicht 315e zurückprojiziert werden.

Ganz in derselben Weise würde sich der Verlauf der Lager und Stossfugen in einem Kreuzgewölbe mit Rippen finden lassen, wobei nur statt der Gratkante die beiden Aufsatzlinien der Rippen zu Grunde zu legen wären.

Für die praktische Ausführung sind, falls nicht zugerichtete Werksteine in Frage kommen, derartige Projektionen der Schichten meist überflüssig. Wenn die Lehrbogen für die Grat- und Scheitelkanten aufgestellt, oder bei Rippengewölben die Rippen eingewölbt sind, so braucht man einem bewanderten Maurer nur anzugeben, dass die Schichten senkrecht zum Kreuzbogen laufen sollen und ihm ausserdem mitzuteilen, ob und nach welchem Stiche oder Halbmesser die Schichten gebust werden sollen, er wird dann imstande sein, die Kappen richtig einzuwölben. Gebuste Schichten sind natürlich dem freihändigen Mauern immer viel günstiger als gerade.

Ungleiche  
Breite der  
Schicht.

Die Figuren 315 und 315a zeigen, wie die Fugenlinien in Grund- und Aufriss vom Diagonalbogen aus divergieren, mithin die einzelnen Schichten nach dem Schildbogen und der Scheitellinie zu an Stärke zunehmen. Bei kleineren Spannungen des Gewölbes ist diese Zunahme indes nicht bedeutend und lässt sich in der Praxis gewinnen, teils indem man die einzelnen Ziegel, die niemals eine völlig gleiche Stärke haben, nach ihrer Stärke sortiert, teils aber auch durch eine blosser Verstärkung der Mörtelfugen nach den Gurtbogen zu. Wird der Breitenunterschied grösser, so kann man in einzelnen Schichten die Steine nach dem einen Ende zu etwas dünner hauen, oder es kann ab und zu eine keilförmige Schicht eingeschaltet werden. Das Zuhauen der Steine muss aber sehr sauber ausgeführt werden, ein durchgängiges Hauen meidet man bei Gewölben mit Rücksicht auf die Festigkeit lieber ganz.

Wird bei ausgedehntem Gewölbe die Breitenverschiedenheit in den einzelnen Schichten so gross, dass sie sich mit den gewöhnlichen Mitteln beim Mauern nicht mehr ausgleichen lässt, dann geht man besser von der konsequenten Durchführung der Fugenlage senkrecht zum Grate ab. Es können zwei nachstehend unter 4 und 5 noch aufzuführende Abarten der vorgeschriebenen Konstruktion gewählt werden.

Es ist aber durchaus nicht gesagt, dass sich „stets“ die Schichten vom Kreuzgrate nach dem Schildbogen verbreitern, es kann sogar der umgekehrte Fall eintreten. Wenn der Schlussstein sehr hoch, die Spitze des Schildbogens aber sehr tief liegt, so kann die Projektion der letzteren in Fig. 317 nach dem Punkte  $n_1$ , statt nach  $n$  fallen, d. h. sie kann unterhalb des Kreuzgrates liegen. Das würde aber, wie ein weiterer Verfolg der Zeichnung bald ausweist, zu Schichten führen, die gerade entgegengesetzt sich vom Grate nach dem Schildbogen verschmälern.

4. Geneigte  
Parallel-  
schichten.

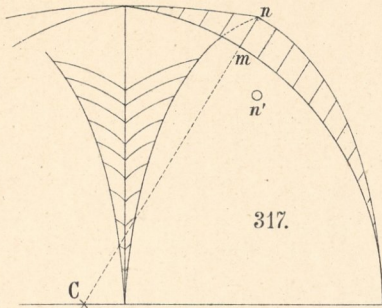
4. Nur die längste Schicht liegt in einer Ebene senkrecht zum Gratbogen, die übrigen Schichten laufen in parallelen Ebenen. Im Diagonalschnitt Fig. 317 legt man die längste Fuge  $mn$  radial nach dem Zirkelpunkte  $C$ . Auf dem Kreuzbogen teilt man dann die Schichtbreiten auf und legt durch die Teilpunkte parallele Linien zu  $mn$ . Damit ist die Projektion der Schichten ermittelt, die man in den Grundriss oder andere Ansichten übertragen kann. Die unteren Schichten steigen von der Diagonale zum Schildbogen schräg an. Wenn man die Stärke der Steigung dem Maurer für die unteren Schichten angiebt, so wird beim gleichmässigen Weitermauern schon von selbst für die langen Schichten etwa die gewünschte Richtung entstehen. Für einfache Fälle wird man ein Austragen der Fugenrichtung nach der Zeichnung nicht nötig haben, man lässt nach ungefährender Schätzung die unteren Schichten etwas schräg vom Kreuzgrate aus steigen und mauert die Kappe mit gleich breiten Schichten bis zur Mitte auf, den Schichten giebt man eine angemessene Busung.

5. Senkrecht  
stehende  
Parallel-  
schichten.

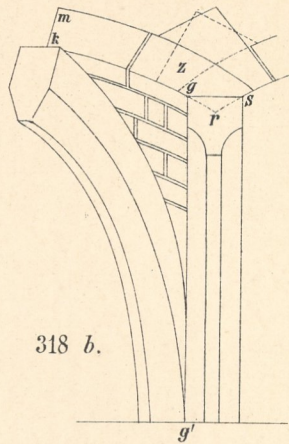
5. Alle Schichten sind im „Grundriss“ einander parallel und senkrecht zur Diagonale gerichtet. Im Diagonalschnitte liegt keine der Fugen mehr radial, vielmehr stellen sich dieselben sämtlich als parallele senkrechte Linien dar. In den Figuren 318 bis 318b ist diese Schichtenlage gezeichnet, auf deren nähere Erklärung verzichtet werden kann.

Man wird auch bei dieser Schichtenrichtung jeder Schicht eine Busung geben. Eine geringe Busung würde selbst dann entstehen, wenn jede horizontale Linie auf der Kappe eine gerade sein sollte, beispielsweise bei einem Einwölben auf horizontalen Schalbrettern.

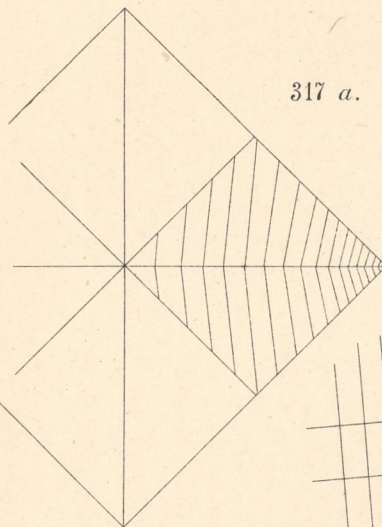
Richtung der Schichten.



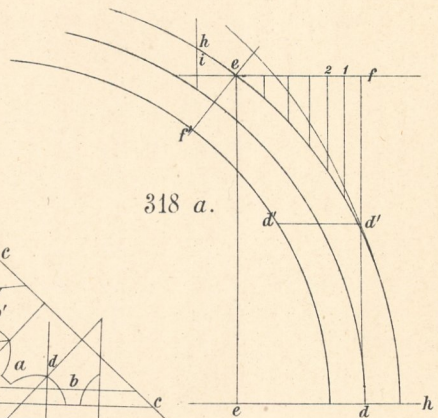
317.



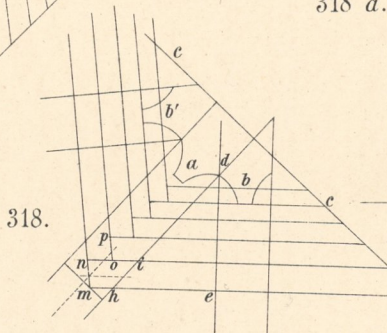
318 b.



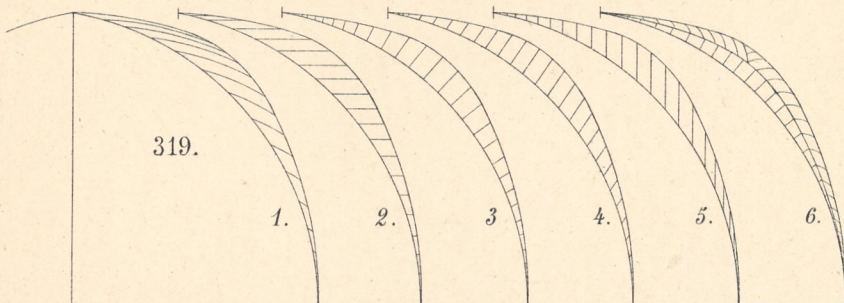
317 a.



318 a.



318.



319.

1. 2. 3. 4. 5. 6.

Die verschiedenen Schichtenlager im Diagonalschnitt.





Wollte man die Kappenschichten gerade machen, was immerhin ausführbar wäre, dann würden die horizontalen Linien auf der Kappe eine kleine, unschöne Krümmung nach innen aufweisen. Bei Verwendung von Kappen mit einer stärkeren Busung würde diese am besten senkrecht nach oben abgesetzt, wobei nach dem von VIOLLET-LE-DUC empfohlenen Verfahren ein senkrecht gestellter verschieblicher Lehrbogen benutzt werden könnte.

Es sind im vorstehenden fünf verschiedene Schichtenanordnungen beschrieben, die sämtlich ihre Berechtigung haben. Um die Unterschiede der fünf Konstruktionen klar hervortreten zu lassen, sind sie in Fig. 319 im Diagonalschnitte vergleichsweise nebeneinander gestellt, 1. zeigt Schichten fortlaufend mit dem Kappenfirste, 2. Horizontalschichten, 3. Radialschichten senkrecht zum Grate, 4. Parallelschichten in schräger und 5. solche in senkrechter Richtung. Der Vollständigkeit wegen ist noch eine Anordnung 6 beigefügt, bei der die Schichten senkrecht zum Grate, zum Gurte und zum Firste liegen und sich in der Mitte der Kappe zusammenschneiden bzw. verschränken.

Zusammenstellung der Schichtlagen.

Welche Schichtenlage zu wählen ist, wird von Fall zu Fall zu entscheiden sein. Für das freihändige Wölben möge jedoch die Aufmerksamkeit wieder den neuerdings viel zu sehr vernachlässigten horizontalen Schichten bei kräftiger Busung zugelenkt sein.

#### Zusammenschnitte der Kappenschichten.

Bei Gewölben mit vortretenden Gurt- und Rippenbogen, deren Profile mit einem Rückenansatz in die Kappen einbinden, treten die Schichten überhaupt nicht zusammen, sondern schneiden sich in einfacher Weise gegen den Rücken, (Fig. 320). Die Wölbsteine sind hier so zu behauen, dass sie sich gut anschliessen. Die Richtung der Schichten ist ziemlich gleichgültig, es hat wenig Wert, sie senkrecht gegen die Diagonale zu führen, man hat höchstens den Zusammenschnitt an den Scheitellinien zu beachten, der beim Vorhandensein einer Scheitelrippe aber auch fortfällt.

Anders verhält es sich bei Bogen, deren Profil ohne Rückenansatz sich unter die Kappen legt, hier schneiden die Schichten über den Bogen zusammen, ihre gegenseitige Richtung ist daher von Bedeutung. Liegt die oben besprochene jetzt viel verwendete Lösung vor, bei welcher die Schichten den Diagonalbogen überkreuzen, so geht hier die eine Schicht direkt in die andere über, auf den Gurten findet dagegen eine Verschränkung statt, die bei rechtwinkeligem Schnitte sich regelmässig nach Fig. 321 oder 322 bildet, bei spitzem Schnitte ist ein Verhauen der Steine nötig, während sich bei unsymmetrischem Zusammentreffen nach Fig. 323 ein Versetzen der Verschränkung bildet. Eine Verschränkung erhalten auch die Kappenschichten in den Scheitellinien, wie die perspektivische Ansicht Fig. 325 zeigt.

Ver-schränkung.

Auf dem Rücken des Diagonalbogens verspannen sich also die zu den verschiedenen Jochen gehörigen beiden Bogen der Kappenschicht einfachsten Falles nach Fig. 324a, es müssen daher die Anfänge beider Bogen eigens zugehauen und hierdurch geschwächt werden. Es ist daher besonders bei grossen Spannungen ratsam, eine Verstärkung des Verbandes an dieser Stelle zu suchen, welche am

leichtesten nach der in der perspektivischen Ansicht Fig. 324 bei  $g'$  gezeigten Weise bewirkt wird, so dass die beiden Bogen abwechselnd mit einem Läufer  $k$  schliessen und mit einem Binder  $l$  anfangen. Auf dem Rücken der Kreuzrippe müssen die einzelnen Ziegel verhauen werden. Es kann dieses Verhauen beschränkt werden, wenn die Rücken der Rippen die in Fig. 324 b gezeigte Gestaltung erhalten.

Gerade umgekehrt wird die Verbindung der Schichten, wenn dieselben gleichlaufend mit dem Gewölbescheitel sind, sie werden dann die Gurtbogen überkreuzen und sich auf den Kreuzbogen verschränken; die Scheitelverschränkung fällt ganz fort.

Rippenlose  
Gewölbe.

Die Ausführung der rippenlosen Gewölbe geschieht in derselben Weise wie diejenige der Rippengewölbe, nur erfordert hier die Herstellung der Gratkanten noch mehr Beachtung. Bei den Bruchsteingewölben des früheren Mittelalters war die Herstellung des Grates immer ein etwas wunder Punkt. Bei sorgfältiger Ausführung verwandte man am Grate mehr oder weniger zugerichtete Werkstücke. Oft begnügte man sich damit, nur einzelne Eckbinder einzuschalten, sonst aber die Steine mit einer Fuge an der Kante zusammentreten zu lassen. Die Vernachlässigung gerade der tragenden Kanten war aber bedenklich, ihre schwere Herstellung trug zum guten Teile zur Einführung der stützenden vorspringenden Rippenbogen bei. Immerhin sind aber im ganzen Mittelalter, besonders in der Profankunst, auch viele rippenlose Gewölbe ausgeführt, wie sie ja auch bei modernen Bauten wieder weitgehende Verwendung finden.

Bei ihnen wird aber die in Fig. 324 gezeigte Verstärkung des Diagonalebogens zur Notwendigkeit. Der Verband wird ebenso bewirkt und unterscheidet sich von dieser Abbildung nur in der Weise, dass das Rippenprofil wegfällt, dagegen an dem Ziegel bei  $g'$  das weggeschlagene Dreieck sitzen bleibt. Meist behält dieser Ziegel seine rechtwinkelige Gestaltung jedoch nicht, sondern er muss, je näher dem Scheitel des Gewölbes, desto stumpfwinkliger verhauen werden.

Zellen-  
gewölbe.

Indes auch dieses Verhauen lässt sich vermeiden, es entstehen hierdurch jene in den Ostseeländern vorzüglich heimischen, in der Regel jedoch nicht nach dem Kreuzgewölbe, sondern nach komplizierteren Systemen angelegten zellenartigen Gewölbe, die so gebildet sind, dass die Gratkante in jedem senkrecht zu ihr geführten Schnitte einen rechten Winkel zeigt. Fig. 326 b.

Zwischen den Gratkanten, die meist reiche Stern- oder Netzformen darstellen, erheben sich die Kappen ähnlich kleinen Pyramiden oder hochgezogenen Mulden. Die Lagerfugen liegen in einer senkrecht zum Bogen (radial) gerichteten Ebene und bilden an der Kante einen rechten Winkel, der einen einfachen Steinverband ermöglicht Fig. 326 c. Gewöhnlich liegen die Fugen zu einer durch den Grat gelegten senkrechten Ebene symmetrisch, so dass sie jederseits mit dieser Ebene einen Winkel von  $45^\circ$  bilden.

Auf letztere Annahme stützt sich die an Fig. 326 und 326 a gezeigte Konstruktion der Fugen. Es ist der Einfachheit wegen ein gewöhnliches Kreuzgewölbe und eine geradlinige Fugenrichtung angenommen, da es sich nur um eine Projektionsaufgabe handelt, welche für die Praxis wenig Bedeutung hat.

Man mache zunächst auf den niedergeschlagenen Bogen eine Einteilung für die darauf zu setzenden Ziegel. Aus den verschiedenen Teilpunkten des Bogens über  $ab$  ziehe man Radien in beliebiger Länge, schneide diese durch einen konzentrischen Bogen in beliebigem Abstände ab, ziehe die Linie  $ll$  parallel  $ab$  in demselben Abstände und projiziere dann die Teilpunkte des

Zuschnitt der Schichten.

