

erhalten zur Aufnahme der Wölbflächen die in Fig. 450, II (S. 387) bereits angegebene Verzahnung.

Die Laibungsflächen dieser Gewölbe werden geputzt, häufig cannelirt, auch entsprechend mit Stuck oder Malerei geschmückt. Die in Folge der Richtung der Stofsugen bestehenden Mängel ihrer Construction werden hierdurch wohl verschleiert, aber nicht beseitigt.

16. Kapitel.

Kuppelgewölbe.

a) Gestaltung der Kuppelgewölbe.

352.
Form.

Die Laibungsfläche des Kuppelgewölbes ist eine Umdrehungsfläche. Dieselbe kann in ihrer einfachsten Form durch Drehung einer gefetzmäßig gebildeten ebenen Curve um eine ihrer Ebene angehörende, feste, lothrecht stehende Axe erzeugt werden, welcher sie bei der Drehung stets ihre concave Seite zuwendet. Jeder Punkt der erzeugenden Curve beschreibt nach vollendeter Drehung einen in wagrechter Ebene liegenden Kreis. Der Grundriß der hiernach gestalteten Laibungsfläche des Kuppelgewölbes ist also gleichfalls ein Kreis.

Diese einfachste Entwicklung der Form einer Kuppelgewölbfläche ist in Fig. 547 mit der erzeugenden Curve C , der festen lothrechten Axe A , dem Grundrißkreise K und einer beliebigen fog. Ringlinie R zur Anschauung gebracht. In der Regel besitzt die als Erzeugende gewählte Curve in ihrem Fußpunkte eine lothrechte Tangente.

Ist diese Curve ein Viertelkreis, so entsteht für die Laibung des Kuppelgewölbes eine Halbkugelfläche. Als dann heißt das Kuppelgewölbe auch Kugelgewölbe.

Die erzeugende Curve, schlank oder weniger schlank aufsteigend, kann ein Kreisbogen, eine Viertelellipse, ein Korbbogen, eine Parabel u. f. f. sein. Je nach der Wahl derartiger Erzeugenden ist die mehr oder weniger zum kräftigen Ausdruck zu bringende Form der Laibungsfläche der Kuppelgewölbe zu gestalten.

Bedingt die angegebene Weise der Erzeugung der Kuppelgewölbfläche einen Kreis als Grundriß, so läßt sich doch selbst bei elliptischem Grundriße die Laibung des fog. elliptischen Kuppelgewölbes nach Fig. 548

durch Drehung der halben Ellipse abc um die große, in wagrechter Ebene liegende

Fig. 547.

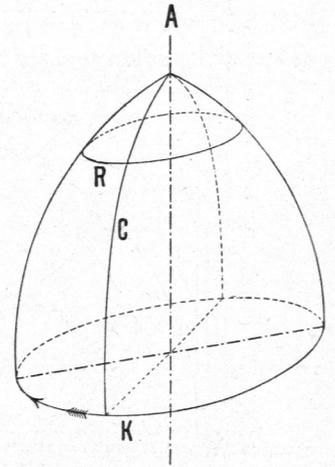
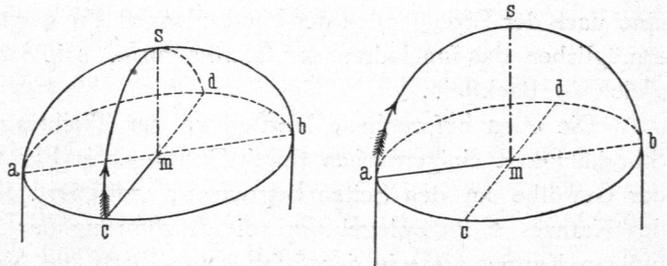


Fig. 548.

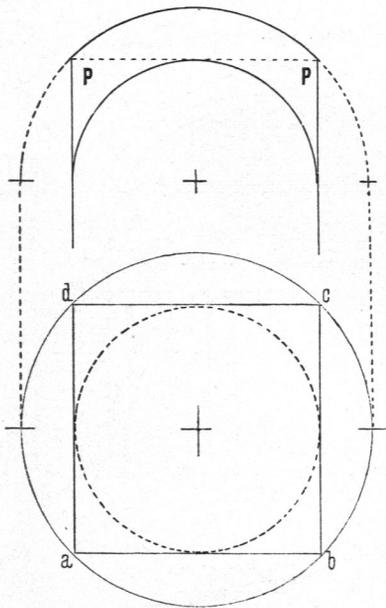


Axe ab oder auch durch Drehung der halben Ellipse cda um die zugehörige kleine Axe cd ebenfalls leicht erzeugen. In ersterem Falle giebt jede rechtwinkelig zu ab stehende Ebene einen Halbkreis als Schnitt, während jede lothrechte, parallel zu ab stehende Ebene die Laibungsfläche nach halben Ellipsen schneidet. Entsprechend würden derartige Schnitte von Ebenen bei der zweiten angegebenen Erzeugungsart der Gewölbfläche zu bestimmen sein. Hier giebt jede rechtwinkelig zu cd stehende Ebene einen Halbkreis als Schnitt.

Durch die beschriebenen Gestaltungen der Kuppelgewölbflächen ist jedoch die Ausbildung der Kuppelgewölbe über kreisrunden oder elliptischen Grundrissen allein keineswegs beschränkt.

Mögen die Kuppelgewölbe in frühester Zeit, abgesehen jedoch von der Ausführung in der Deckenbildung selbst, vorwiegend über Räumen mit reinem Kreisgrundriss hergestellt sein, weil diese Anordnung naturgemäfs am nächsten lag, so zeigt sich beim Verfolgen des Weges, welchen die Entwicklung des Gewölbebaues eingeschlagen hat, sehr bald die Spur, welche darauf hinweist, Kuppelgewölbe über zehneckigen, achteckigen, also vieleckigen, und weiter über quadratischen Grundrissen in Anwendung zu bringen.

Fig. 549.



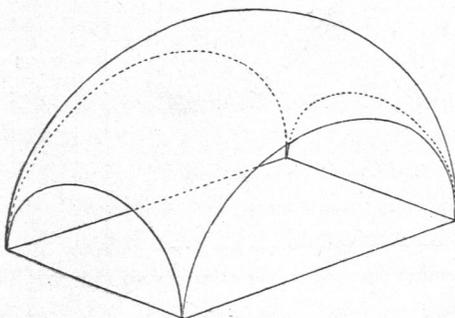
Baugeschichtliche Anhaltspunkte hierfür sind in Theil II, Band 2 dieses »Handbuches« geboten.

Befondere, nach verschiedenen Seiten sich geltend machende Systeme in der Gestaltung der Kuppelgewölbe werden im Allgemeinen durch die quadratische Grundriffsform veranlaßt.

Bleibt zuerst die Umdrehungsfläche als Laibungsfläche des Kuppelgewölbes bestehen, wie solches einem Kreisgrundriss angehören würde, so geht der Grundkreis dieser Kuppelfläche (Fig. 549) durch die Ecken a, b, c, d des quadratischen Grundrisses. In den Seiten ab, bc u. f. f. aufgestellte lothrechte Ebenen schneiden von der Gewölbfläche genau bestimmbare Stücke ab, so daß die Fußpunkte a, b, c, d der Kuppel die Anfänge von Kuppelzwickeln $P,$

Pendentifs genannt, sind, welche seitlich durch die Schnittlinien der Ebenen ab, bc u. f. f. begrenzt werden. Diese Schnittlinien bilden die Stirnbogen der Kuppelgewölbfläche. Hierdurch entsteht das System

Fig. 550.



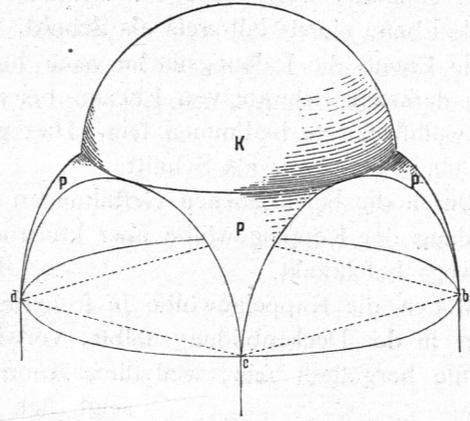
der sog. einfachen Stutzkuppel oder Hängekuppel. Im Besonderen kann die Gestaltung derartiger Stutzkuppeln auch über rechteckigen Grundrissen (Fig. 550) oder über vieleckigen Grundrissen, deren Ecken dann aber zweckmäfsig, zur Vermeidung ungleicher Höhenlage der Fußpunkte der Kuppelzwickel, im Grundkreise der Kuppelflächen liegen, Platz greifen.

Müssen die Fußpunkte der Kuppelzwickel

353.
Stutz- oder
Hängekuppel:
Erstes
System.

in besonderen, von der Grundrifsbildung der zu überdeckenden Räume abhängigen Fällen eine ungleiche Höhenlage erhalten, so ist die Gestaltung der Kuppelgewölbfläche mit Pendentifs füglich doch bei jedem beliebig begrenzten Grundrifs möglich, wenn nur der in der Ebene der Grundrifsfigur liegende Grundkreis der Kuppelfläche im Allgemeinen die Grundrifsfläche des Raumes umzieht.

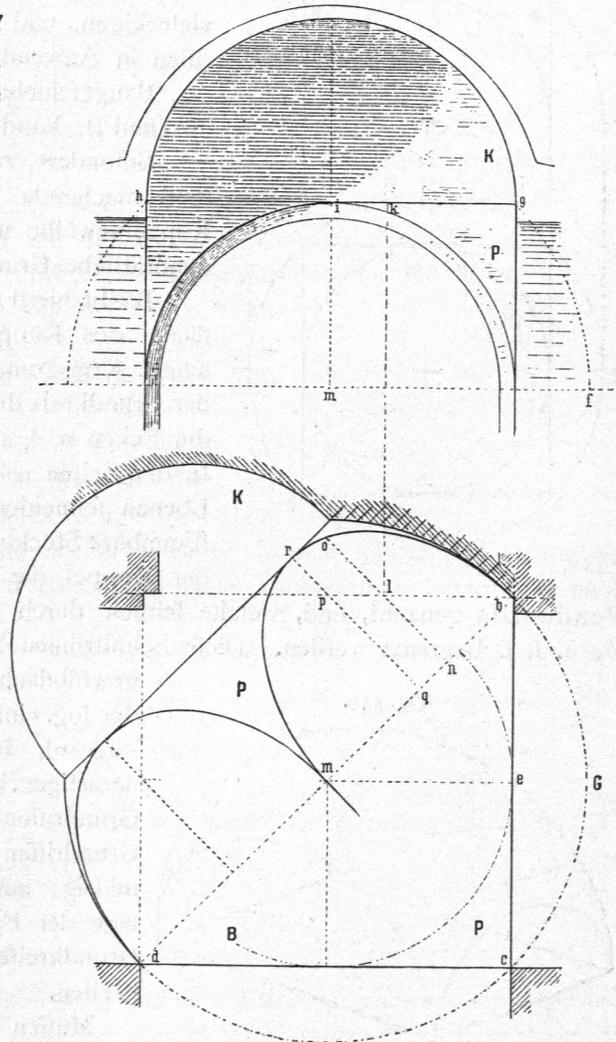
Fig. 551.



354.
Zweites
System.

Geht man wiederum von einem quadratischen Grundrifs aus, so erfolgt ein zweites System der Gestaltung der Hängekuppel, sobald über einer Kuppelfläche P (Fig. 551), deren Grundkreis bcd dem Quadrat umschrieben ist und welche dabei in ihrer Laibung die Kuppelzwickel P allein liefert, noch eine zweite Kuppelfläche K gebildet wird, deren Grundkreis den eingeschriebenen Kreis des Quadrats als wagrechte Projection besitzt.

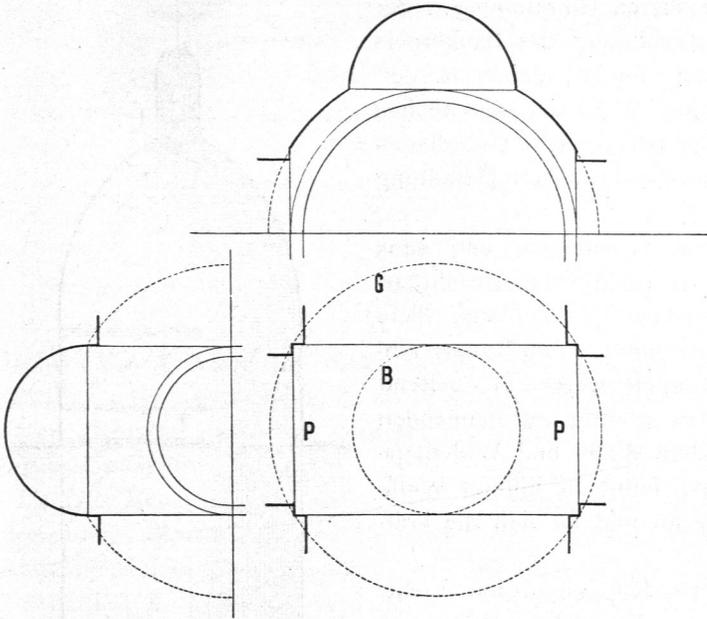
Fig. 552.



Bei der Annahme der Kuppelflächen als Kugelflächen ist in Fig. 552 die zeichnerische Durchbildung dieses zweiten Systems der Gestaltung der Hängekuppel über einem quadratischen Grundrifs näher angegeben. Das Kreisstück G kennzeichnet den umschriebenen, für die Gestaltung der Pendentifs P der unteren Kuppelfläche maßgebenden Grundkreis, während das Kreisstück B , dem eingeschriebenen Kreise angehörig, die wagrechte Projection des Grundkreises der aufgesetzten Kuppelfläche bedingt.

Will man statt der Kugelflächen P und K andere, gesetzmäßig gestaltete und in günstiger Form auftretende Umdrehungsflächen als Kuppelgewölbflächen anwenden, so bleiben die Grund-

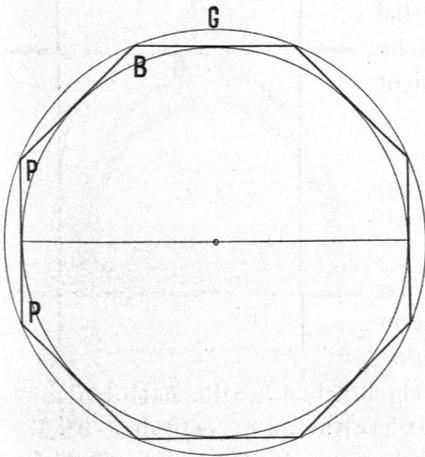
Fig. 553.



beiden langen Seiten der Grundrissbegrenzung durch Verkleinerung seines Halbmessers Abstand genommen werden.

Wird zwischen dem unteren, die Pendentifs enthaltenden Theile der Hängekuppel und der oberen aufgesetzten Kuppelfläche noch eine lothrechte cylindrische Gewölbfläche *T*, Trommel oder Tambour genannt (Fig. 555), eingefügt, welcher der Grundkreis *B* als Leitlinie zugewiesen wird, so entsteht das System der fog. Hängekuppel mit Tambour.

Fig. 554.



Abchluss des Kuppelgewölbes. Die Ringschicht, welche diese Oeffnung begrenzt, heisst Lichtkranz, Lichtring, auch Schlufsring. Die Oeffnung selbst, in irgend einer Weise als Deckenlicht verwerthet, gestattet die Beleuchtung der Kuppel durch Tageslicht in nicht zu unterschätzender Weise.

Benutzt man den Lichtkranz als Träger eines besonderen, in einfacher oder reicher Art ausgeführten, mit Lichtöffnungen versehenen Kuppelaufsatzes *L*, Laterne genannt, so entsteht das Kuppelgewölbe mit Laterne (Fig. 555).

kreife *G* und *B* unverändert bestehen.

Dieses zweite System der Gestaltung der Hängekuppel kann unter entsprechender Beachtung und Einfügung der Grundkreife *G* und *B* auch über rechteckigen Grundrissen (Fig. 553) oder mehrseitigen regelmäßigen Grundrissen (Fig. 554) zur Durchführung gelangen. Zahl und Form der hierbei auftretenden Pendentifs *P* sind sofort zu erkennen. Beim Festlegen des Grundkreises *B* kann auch selbst von feiner Berührung mit den

355.
Drittes
System.

In der Regel werden in dem Tambour, dessen Höhe, der architektonischen Durchbildung der gefamnten Kuppelanlage gemäß, sehr verschieden ausfallen kann, Lichtöffnungen zur Erhellung der Kuppel durch Tageslicht angebracht.

Die bei den Kuppelgewölben ganz besonders beachtenswerthe Einwölbungsart nach concentrischen Ringschichten, worauf bereits in Art. 315 (S. 460) näher hingewiesen ist, gestattet die Schaffung einer freien Oeffnung als

356.
Lichtring.

Die Krönungen der Kuppeln, mögen dieselben in der Formgebung der äußeren Umrahmungen der Lichtkränze oder in der Ausbildung des Baukörpers der Laternen ihren Ausklang finden, geben in Verbindung mit einer glücklichen Wahl der eigentlichen Bogenlinie der Kuppelfläche belangreiche Grundlagen für die würdige und hervorragende äußere Gestaltung bedeutungsvoller Bauwerke.

Die Erkenntnis dieser Grundlagen und ganz besonders die Einfachheit der praktischen Ausführbarkeit der Kuppelgewölbe gaben Veranlassung, diese Gewölbe als »Groß-Constructions« ersten Ranges einzuführen. Durch die bei Kuppelgewölben sich geltend machenden, im Allgemeinen günstig zu nennenden statischen Verhältnisse zwischen Wölb- und Widerlagkörper fand das Bestreben, selbst in kühner Weise Kuppelbauten zu errichten, an und für sich die kräftigste Unterstützung.

357.
Stichkappen.

Sollen im eigentlichen Kuppelgewölbe Lichtöffnungen angebracht werden oder reichen die oberen Abschlussbögen von Fenster- bzw. Thüröffnungen über den Fuß des Kuppelgewölbes hinauf, so werden für diese Anlagen wieder die sog. Stichkappen erforderlich. In den meisten Fällen gehören die Laibungen der Stichkappen Kegelflächen an, deren Axen nach dem Mittelpunkte des Grundkreises der mit Stichkappen zu versehenen Kuppelflächen gehen. Hierbei ist jedoch die Wahl einer Cylinder- oder Kugelfläche für die Laibungen der Stichkappen durchaus nicht ausgeschlossen.

Das über die Ausmittlung der Stichkappen beim Tonnengewölbe in Art. 164 bis 167 (S. 235 bis 243) Gesagte bleibt im Wesentlichen auch beim Kuppelgewölbe geltend.

Eben so bleiben auch hier die sämtlichen Gesichtspunkte, welche beim Kloftergewölbe in Art. 206 (S. 306), bzw. in Art. 207 (S. 307) für die Bildung der Stichkappen oder Lunetten aufgestellt sind, ihrem eigentlichen Inhalte nach bestehen.

Vollständig ringförmige Stichkappen, sog. Ochsenaugen, entstehen bei der Durchdringung von Kegelflächen, bzw. Cylinderflächen mit der Kuppelgewölbfäche. Meistens werden Kegelflächen gewählt. Die Leitlinie der Kegelflächen kann ein Kreis oder eine Ellipse sein. Die Kegelaxen sind wiederum zweckmäßig nach dem Mittelpunkte der zu durchdringenden Kuppelfläche gerichtet. Die Spitzen der Kegelflächen der runden Stichkappen liegen in entsprechender Entfernung oberhalb der Rückenfläche des Kuppelgewölbes.

Die Ausmittlung dieser ringförmigen Stichkappen erfolgt durch die an und für sich einfache Bestimmung der Schnittlinien der Kegelflächen mit der Kuppel-

Fig. 555.

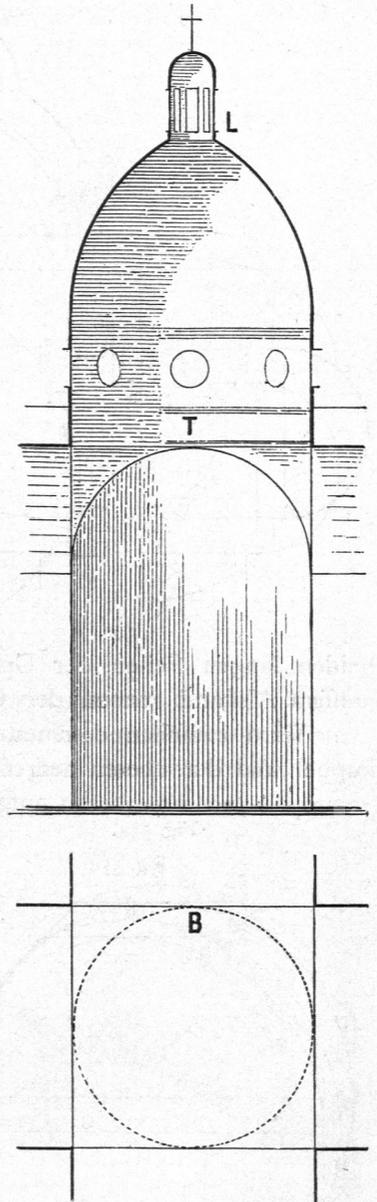
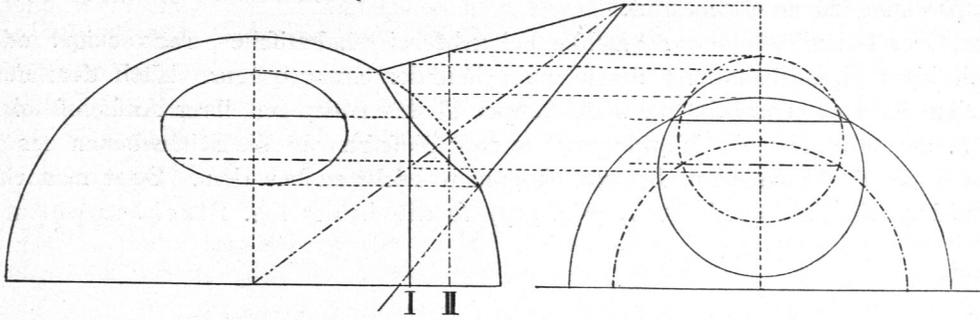


Fig. 556.



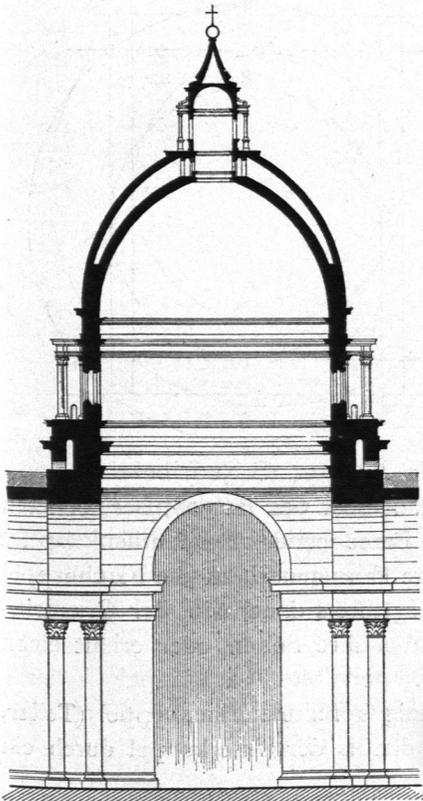
fläche. Die Anleitung zu dieser Bestimmung giebt Fig. 556, wobei für das Hauptgewölbe eine Kugelfläche, für die Laibung der runden Stichkappe eine Kegelfläche, deren Schnitte durch die lothrechten Ebenen *I*, *II* u. f. f. Kreise werden sollen, angenommen ist.

Die Ermittlungen der inneren Begrenzungen und die damit in Verbindung stehenden allgemeinen Gestaltungen des Ochsenauges bieten auch bei anderen Laibungsflächen des Gewölbes und der Stichkappen keine Schwierigkeiten. Die geschaffene Lichtöffnung wird durch einen im Kuppelgewölbe liegenden Wölbkranz umrahmt.

Erheben sich über einem gemeinschaftlichen Grundrisse zwei in geringerer oder größerer Entfernung über einander liegende selbständige Kuppelgewölbe mit von

358.
Doppel-
kuppel.

Fig. 557.



einander verschiedenen Umdrehungsflächen, so entstehen die sog. Doppelkuppeln. Ihre Bestandtheile sind das gemeinschaftliche Widerlager, die innere Kuppel und die äußere Kuppel oder die Schutzkuppel. Letztere bildet gleichsam das Dach, um schädliche Witterungseinflüsse vom inneren Kuppelgewölbe fern zu halten. In der Regel treten beide Kuppelgewölbe in geringer Höhe über ihrem Widerlager zu einem gemeinschaftlichen Gewölbstücke zusammen und zweigen sich erst von diesem Fuskörper aus nach oben hin von einander ab.

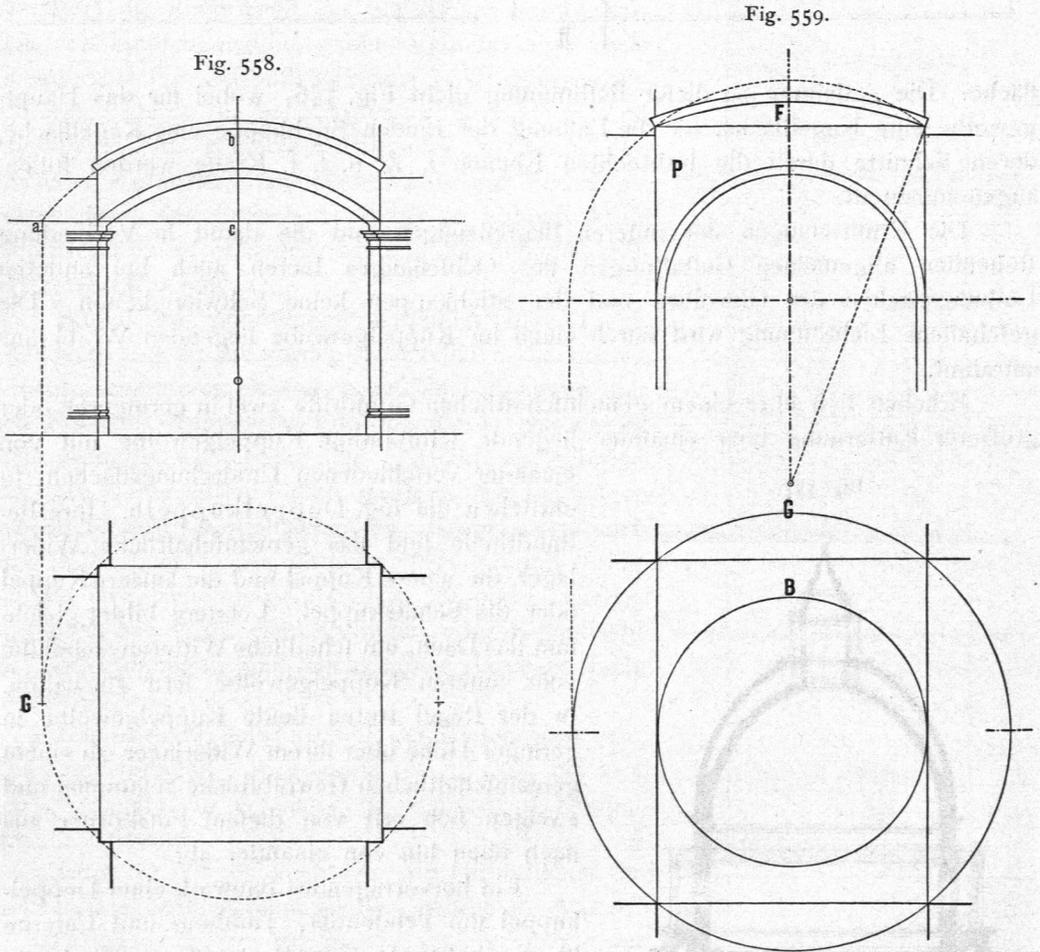
Ein hervorragendes Bauwerk einer Doppelkuppel mit Pendentifs, Tambour und Laterne ist die bekannte Kuppel der *Peters-Kirche* in Rom (Fig. 557). Die gleichfalls berühmte Doppelkuppel des Domes zu Florenz ist ihrer Gestaltung nach, wie aus dem in Art. 204 (S. 302) Gefagten näher gefolgert werden kann, als eine dem Kloftergewölbe angehörende Haubenkuppel oder Walmkuppel mit Tambour und Laterne anzusehen.

Ist die Erzeugende der Laibungsfläche des Kuppelgewölbes irgend ein Flachbogen *ab* (Fig. 558), so entsteht die einfache Flach-

359.
Flachkuppel.

kuppel, welche später als fog. böhmisches Kappengewölbe noch einer näheren Befprechung zu unterziehen ist.

Der Grundkreis G der Flachkuppel geht bei quadratischer, rechteckiger oder vieleckiger Grundrißsbildung durch die Ecken der Grundrißfigur. Nach dem Feststellen der Laibungsfläche der Flachkuppel ist das Austragen ihrer Anschlußlinien, d. h. der Stirnlinien der Flachkuppel, so weit dieselben für die Seitenebenen des zu überdeckenden Raumes in Betracht kommen, leicht zu bewirken. Setzt man eine Flachkuppel F auf Pendentifs P (Fig. 559), so tritt in der fog. Flachkuppel mit



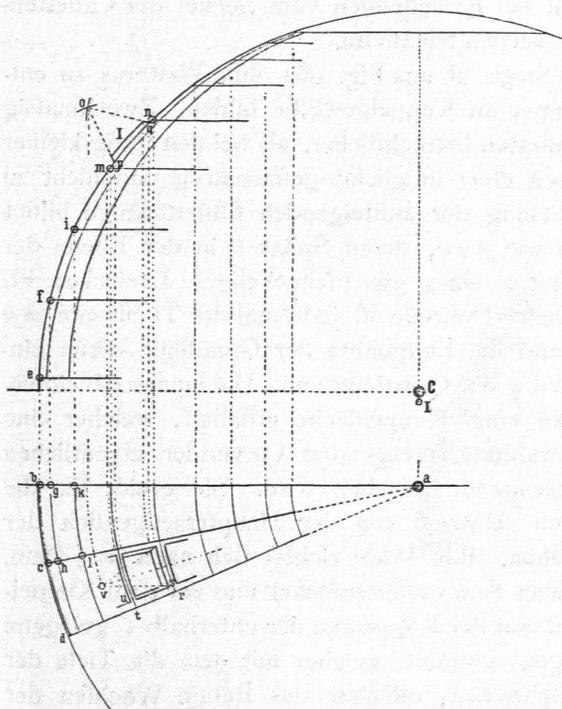
Pendentifs nur eine geringe Umgestaltung des in Art. 354 (S. 506) bezeichneten zweiten Systems der Hängkuppel ein. Die Kuppelfläche mit den Pendentifs P besitzt neben ihrem besonderen Grundkreise G eine andere Erzeugende, als die Flachkuppel mit dem selbständigen Grundkreise B . Dieser liegt stets innerhalb der Grundrißfläche des zu überwölbenden Raumes, berührt dabei ihre Seiten oder erhält einen größeren oder geringeren Abstand von denselben.

Die häufig sehr niedrig gehaltene, tellerförmig gestaltete Flachkuppel (Teller, Nabel, Calotte) wird oft vortheilhaft von den Pendentifs der Unterkuppel durch ein ringförmig geführtes Gefims getrennt.

Die Laibungsfläche des Kuppelgewölbes kann in mannigfaltigster Weise durch Malerei, Stuck, vortretende Rippen u. f. w. verziert werden. Vielfach erfolgen Ausstattung und Gliederung der Laibung der Kuppelgewölbe durch die schon beim Tonnengewölbe in Art. 163 (S. 234) erwähnten Caffetten. Dieselben können mit ihren Stegen die wechselfullsten Formen annehmen, dabei besonders geordnete, neben einander liegende oder mit einander verchlungene Felder bilden und in mancherlei Weise mit Gliederungen, Rosetten, Arabesken, figürlichen Darstellungen in einfacher oder reicher Ausstattung versehen werden. In der Nähe des Scheitels des Kuppelgewölbes läßt man zur Vermeidung der hier zu klein erscheinenden Caffetten den fog. Spiegel oder Nabel der Kuppel meistens ohne Caffettentheilung. Je nachdem

360.
Caffettirte
Kuppel-
gewölbe.

Fig. 560.



der Scheitel des Gewölbes mit einem Deckenlicht versehen wird oder seine ursprüngliche Gewölbebildung behält, ist eine entsprechende Ausschmückung des Gewölbspiegels vorzunehmen.

Für die Anordnung der Caffetten sollen einige Grundlagen mitgeteilt werden, welche im Allgemeinen die möglichste Einfachheit bewahren.

361.
Caffetten-
Anordnung:
I.
Verfahren.

Das zeichnerische Ausmitteln der Caffetten mit den trennenden Stegen kann nach Fig. 560 auf folgendem, sehr einfachem Wege vorgenommen werden.

Auf dem Grundkreise oder der Kämpferlinie bd der Laibungsfläche des Kuppelgewölbes bestimmt man gleiche Theilweiten bc, cd u. f. f. und setzt die nach den Theilpunkten b, c, d u. f. f. gezogenen Halbmesser ab, ac, ad u. f. f. als wagrechte Projectionen der Mittellinien der nach dem Scheitel der Kuppel aufsteigenden Stege fest. Soll den Caffetten eine nahezu quadratische Form gegeben werden, so trägt man auf der Erzeugenden der Kuppel, welche hier als ein um C beschriebener Viertelkreis

mit dem Halbmesser ab gewählt, zugleich die lothrechte Projection der Mittellinie des Stegs ab ist, unter Beachtung einer passenden Entfernung über die Kämpferebene des Gewölbes, z. B. von e aus, die Theilweite bc des Grundkreises bd als ef ab. Hierauf ermittelt man die Grundrifs-Projection des Punktes f auf ab in g und beschreibt um a mit dem Halbmesser ag einen Kreis. Derselbe giebt die Grundrifs-Projection der Mittellinie des ersten, concentrisch mit der Kämpferlinie der Kuppel ziehenden Caffettensteiges. Seine Schnitte g, h mit den Steglinien ab, ac u. f. f. sind die oberen Eckpunkte der Theilrisse der ersten Caffettenreihe. Die unteren Eckpunkte der Theilrisse dieser Reihe erhält man nach Ermitteln der Grundrifs-Projection des Punktes e auf ab . Die Schnitte des Kreises, welcher durch diese Grundrifs-Projection bestimmt und in der Zeichnung punkirt dargestellt ist, mit den Geraden ab, ac u. f. f., sind die gefuchten Endpunkte.

Liegt bei einer fog. Ueberhöhung der Kuppel die Kämpferebene unter C , so erhält die Caffettenanlage in Folge der günstigen Annahme des Punktes e in zweckmäßiger Weise einen entsprechend hohen Sockel. Hierdurch ist selbst bei einem kräftig ausladenden Kämpfergefims die untere Caffettenreihe noch deutlich und vollständig vom Fußboden des überwölbten Raumes aus zu erkennen.

Für die Theillinien der zweiten Caffettenreihe wird die Weite $gh = fi$ auf der Erzeugenden abgetragen und nunmehr wiederum ganz im Sinne des für das Ausmitteln des ersten Caffettenzuges Gefagten verfahren. Auf dem beschriebenen Wege erhält man nach und nach die sämtlichen Netzlinien für die Caffetten.

Sollen über Ecke gestellte oder vieleckig begrenzte Cassetten angewendet werden, so kann das oben besprochene Netz als Hauptnetz für das Einzeichnen der Theillinien beliebig geformter Cassetten leicht benutzt werden.

Die Stege zwischen den aufsteigenden Cassettenreihen treten vom Cassettensockel bis zum Kuppel Spiegel mit stetig verjüngter Breite auf. Ihre Grenzlinien sind Meridianbogen der Kuppelfläche. Setzt man die gewünschte Breite dieser Stege unter Beachtung der Mittellinien des Hauptnetzes im Grundrisse am Sockel der Cassettenreihen fest, so ergeben sich durch Ziehen der zugehörigen Halbmesser die wagrechten Projectionen der Seitenlinien, wie z. B. su , der aufsteigenden Stege.

Die Breite der sämtlichen Querstege der Cassetten wird in der Grundriss-Projection meistens gleich groß genommen. In der Aufriss-Projection zeigen sich diese Querstege dann in Abschnitten auf der Erzeugenden vom Sockel der Cassettenanlage bis zum Spiegel der Kuppel in verjüngter Breite.

Die zeichnerische Darstellung der Stege ist aus Fig. 560 ohne Weiteres zu entnehmen. Die Cassetten sollen Vertiefungen im Kuppelgewölbe bilden. Zweckmäßig ist die Vertiefung bei den größeren Cassetten beträchtlicher, als bei den stetig kleiner werdenden Cassetten. Zum Herbeiführen einer möglichst gefetzmäßig und nicht zu scharf erfolgenden Abnahme der Vertiefung der aufsteigenden Cassettenzüge bildet man die Vertiefungen nach Pyramiden wie $p q o$, deren Spitze o in der Ebene der Erzeugenden der Kuppelfläche die Spitze eines gleichschenkeligen Dreieckes ist. Die Länge der Schenkel $p o$ und $q o$ solcher Dreiecke ist jedesmal der Theilweite mn der zugehörigen Cassette gleich, während die Endpunkte der Grundlinie dieser einzelnen Dreiecke die inneren Punkte p und q der Querstege sind. Die innere Abschlussfläche der Cassetten wird durch Stücke einer Kuppelfläche erhalten, welcher eine besondere, in der Form von der gewählten erzeugenden Curve der eigentlichen Laibungsfläche etwas abweichende Erzeugende gegeben wird. Sie erhält für die unteren Cassettenreihen einen größeren Abstand von der Haupterzeugenden der Kuppel, als für die oberen Cassettenreihen. Ihre Wahl richtet sich nach der Tiefe, welche man den Cassetten unmittelbar über dem Cassettensockel und vor dem Kuppel Spiegel geben will. In der Zeichnung ist auf der Kuppelaxe der unterhalb C gelegene Punkt I als Mittelpunkt eines Kreisbogens gewählt, welcher mit dem die Tiefe der Cassetten fest legenden Halbmesser beschrieben, offenbar das stetige Wachsen der Vertiefungen der Cassetten vom Kuppel Spiegel bis zum Cassettensockel bedingt. Für eine Cassette über $p q$ ist ein Stück I dieses Bogens gezeichnet.

Ist für eine aufsteigende Cassettenreihe die Spitze o der zugehörigen Pyramide, ist außerdem die Abschlusslinie I der einzelnen Cassetten durch die Aufriss-Projection in einer Meridianebene bestimmt, so lassen sich die wagrechten Projectionen der einzelnen Cassetten finden. Für die Cassette über $p q$ ist v die wagrechte Projection der Pyramiden spitze o . Mit Benutzung des Punktes v und der Aufriss-Projectionen der Cassette $p q$ wird, wie aus der Zeichnung unmittelbar zu erkennen ist, die Darstellung des Grundrisses der Cassetten leicht ermöglicht.

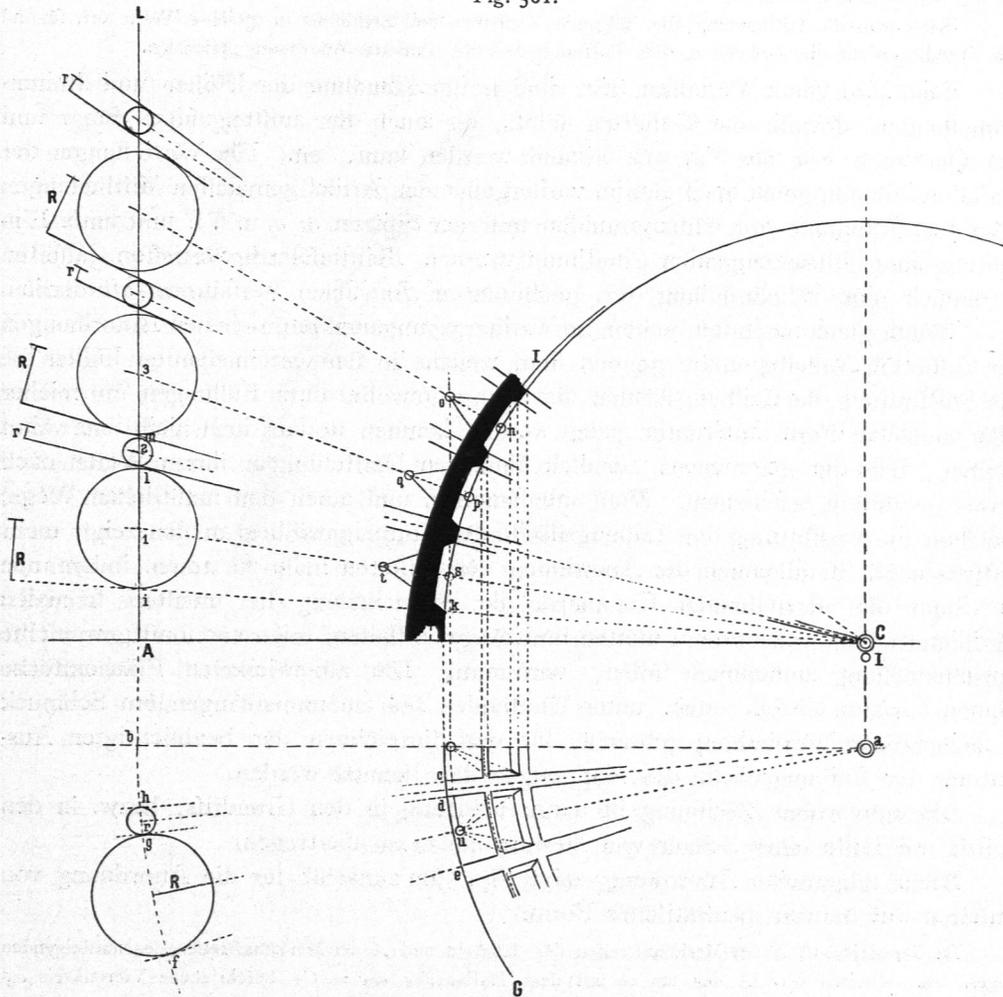
Sollen die Cassetten staffelartig angelegte Umrahmungen erhalten, so ist das für die Ausmittlung der Cassetten angegebene Verfahren nur der Zahl der Staffeln entsprechend oft zu wiederholen.

Ein zweites Verfahren für die Gestaltung der Cassetten mit ihren Stegen ist unter der Bezeichnung »*Emy'sches Verfahren*« bekannt. Hierbei wird nach Fig. 561 der Kreis G der oberen Kante k des Cassettensockels als Theilkreis für die Weiten ed

der unteren Caffettenreihe und der Breiten cd des Fusses der Stege zu Grunde gelegt. Die Meridianschnitte ac , ad , ae u. f. f. bestimmen die Begrenzungen der Caffettenreihen.

Für die Aufriffe der Caffetten und Stege auf der Erzeugenden der Kuppel, welche hier als ein C beschriebener Viertelkreis angenommen ist, werden Hilfskreise mit dem Halbmesser R für die Caffetten und dem Halbmesser r für die Stege benutzt, welche mit den Theilbreiten de und cd des Theilkreises G in Abhängigkeit gebracht werden. Hierzu beschreibt man im Grundrisse mit dem beliebigen, entsprechend groß gewählten Halbmesser ab um a den Kreisbogen bf und erweitert die Strahlen ac , ad , ae bis zu ihren Schnitten h , g , f mit dem Kreisbogen bf . Die Linien ah und ag folgen Tangenten des kleinen Kreifes mit den Berührungspunkten h und g werden.

Fig. 561.



Der Schnitt der hier nicht gezeichneten Lothe in h auf ah und in g auf ag bestimmt den Mittelpunkt dieses Kreifes und die Größe seines Halbmessers r . Außerdem sollen die Linien ag und af Tangenten des großen Kreifes mit den Berührungspunkten g und f werden. Lothe in g auf ag und in f auf af schneiden sich im Mittelpunkte des gefuchten Kreifes, wonach alsdann die Größe des Halbmessers R zu bestimmen ist.

Für den Aufriß wird in der Meridianebene CA der Kuppel die Länge $CA = ab$ abgetragen und in A auf CA das Loth AL errichtet. Durch den gegebenen, in der oberen Sockelkante der Caffettenreihen liegenden Punkt h wird die entsprechend verlängerte Gerade Ci gezogen. Das auf Ci an beliebiger Stelle errichtete Loth R erhält die Länge des Halbmessers R des für die Caffettenbreite festgestellten Hilfskreifes gf . Zieht man durch den Endpunkt des Lothes R die Parallele zu Ci , so trifft

dieselbe die Gerade AL im Punkte r . Der um r mit dem Halbmesser R beschriebene Kreis wird für die Höhe der ersten Caffettenreihe maßgebend. Die verlängerte Gerade Ck ist aus Gründen, welche, wie leicht ersichtlich, durch die Zeichnung an und für sich bedingt sind, eine Tangente des Kreises. Zieht man von C aus eine zweite Tangente Cl dieses Kreises, so wird die Höhe der ersten Caffettenreihe auf der Kuppelerzeugenden erhalten.

Zum Festlegen der nun folgenden Steghöhe wird wiederum in einem beliebigen Punkte der Tangente Cl das Loth r von der Länge des Halbmessers r des für die Stege ermittelten Hilfskreises hg errichtet und durch den Endpunkt dieses Lothes eine Parallele zu Cl gezogen, um im Schnitte a dieser Parallelen mit AL den Mittelpunkt des für die Steghöhe maßgebenden Kreises mit dem Halbmesser r zu erhalten. Eine von C aus an diesen Kreis gezogene Tangente Cm schneidet die gefuchte Steghöhe auf der Kuppelerzeugenden ab.

Setzt man die Bestimmung aller folgenden Caffetten- und Steghöhen in gleicher Weise fort, so sind alle Grundlagen für die Vollendung des Gesamtnetzes der Caffetten-Anordnung geschaffen.

Beim Emy'schen Verfahren tritt eine stetige Abnahme der Höhen- und Breitenabmessungen, sowohl der Caffetten selbst, als auch der aufsteigenden Stege und der Querstege, wie aus Fig. 561 erkannt werden kann, ein. Die Vertiefungen der Caffetten können genau nach den im vorhergehenden Artikel gemachten Mittheilungen unter der Annahme von Hilfspyramiden mit den Spitzen o, q u. f. f. und unter Einführung einer Hilfs erzeugenden I bestimmt werden. Bei stoffelartig vertieften Caffetten ist einfach eine Wiederholung des geschilderten Emy'schen Verfahrens erforderlich.

363.
III.
Verfahren.

Wenn gleich nach den beiden, im Vorhergegangenen besprochenen Anordnungen der Caffetten Anhaltspunkte geboten sind, welche in den verschiedensten Fällen bei der Ausstattung der Laibungsflächen der Kuppelgewölbe durch Füllungen mit reicher oder einfacher Form zu Grunde gelegt werden können, so darf doch nicht unerwähnt bleiben, daß die gegebenen, ziemlich einfachen Darstellungen ihrem Wesen nach etwas gekünstelt erscheinen. Weit unbefangener und auch dem natürlichen Wege, welchen die Ausstattung der Laibungsfläche des Kuppelgewölbes an sich zeigt, mehr entsprechend, ist allgemein der Anordnung der Caffetten nahe zu treten, indem man im Sinne der darstellenden Geometrie die Abwicklung der meistens schmalen Meridianstreifen, welche die Caffetten und Stege enthalten, oder eine sonst gewünschte Ausschmückung aufnehmen sollen, vornimmt. Die abgewickelten Flächenstücke können alsdann einzeln oder, unter Umständen bei zusammenhängendem Schmuck in fachgemäße Verbindung gebracht, für das Einzeichnen der beabsichtigten Ausstattung der Laibungsfläche des Kuppelgewölbes benutzt werden.

Die entworfene Zeichnung ist dann rückläufig in den Grundrifs, bezw. in den Aufrifs mit Hilfe einer Schaar von Meridianlinien zu übertragen.

Diese allgemeine Anordnung zeigt Fig. 562 zunächst für die Anordnung von Caffetten mit nahezu quadratischer Form.

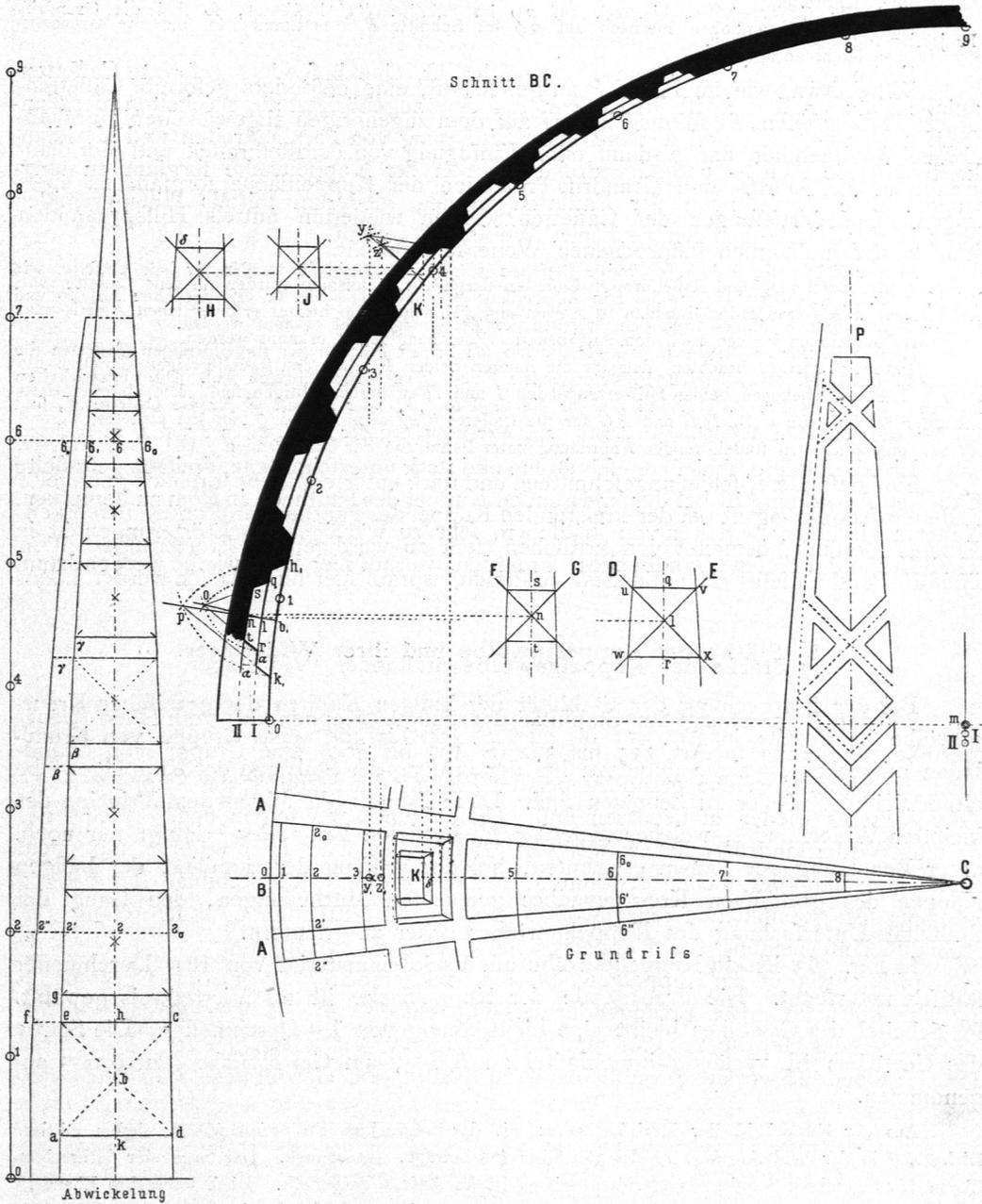
Im Grundrifs ist B der Meridianstreifen der Caffetten und A der Meridianstreifen des aufsteigenden Steges. Im Schnitte BC ist der um m mit dem Halbmesser $mo = Co$ beschriebene Viertelkreis og die Erzeugende des Kuppelgewölbes.

Der Viertelkreis og ist in 9 gleiche Theile getheilt. Im Plane der Abwicklung sind die Erstreckungen $o1, 12$ u. f. f. gleich den Bogenlängen $o1, 12$ u. f. f. auf der lothrechten Linie og abgetragen.

Durch die Punkte $o, 1, 2$ u. f. f. gezogene Wagrechte müssen bei der durch k lothrecht gelegten Erstreckung der Meridianlinie über Co des Grundrisses die erstreckten Bogenlängen der durch $o, 1, 2$ u. f. f. um C im Grundrifs beschriebenen Bogen der Parallelkreise der Kuppelfläche je zur Hälfte nach links und rechts von der Linie k aus, so weit dabei die Meridianstreifen A und B in Betracht kommen, aufnehmen. So ist z. B. bei der durch 2 angenommenen wagrechten Linie $22_0 = 22$, gleich der Erstreckung der Bogenlänge $22_0 = 22$, im Grundrifs für den Meridianstreifen B . Eben so ist hier für den Meridianstreifen A die Länge $2, 2_1$, gleich der erstreckten Bogenlänge $2, 2_1$, im Grundrifs. In gleicher Weise ist noch bei der wagrechten Linie 66_0 in der Abwicklung und dem Bogen $6_0 6_1$, im Grundrifs verfahren.

Ist die Abwicklung der Meridianstreifen *B* und *A* vollständig gezeichnet, so kann das Eintragen der unteren und oberen Seitenlinien der Caffetten in folgender Weise geschehen. In der Höhe *k* der Abwicklung über dem Fusse *o* des Kuppelgewölbes ist *ad* als erste untere Caffettenlinie fest gelegt. Von *a* und *d* aus sind unter einem Winkel von 45 Grad zu *ad* die Linien *ac* und *de* gezogen. Die Wagrechte *ec* bestimmt die obere Linie der nahezu quadratisch geformten Caffette.

Fig. 562.



Um die Breite des nun folgenden Querrieges zu erhalten, ist die Gerade *ec* bis zur Abwicklungslinie des Meridianstreifens für den aufsteigenden Steg nach *f* zu führen und in *f* eine Linie *fg* unter 45 Grad zu *cf* zu ziehen. Die durch *g* gelegte Wagrechte giebt die untere Seite der zweiten Caffettenreihe. Auf diesem Wege schreitet man nach und nach vor, um, wie aus dem Plane der Abwicklung

genau zu verfolgen ist, die Caffetten- und Steganlage vollständig in der Abwicklung zur Darstellung zu bringen.

Das Zurückführen der unteren und oberen Seitenlinien der Caffetten auf die Gewölbfläche wird mittels der Erzeugenden og im Schnitte BC vorgenommen. Hier ist z. B. die Bogenlänge k, b , durch Benutzung kleiner Theilstrecken der Länge $k\bar{b}$ gleich der Erstreckung $k\bar{b}$ der Abwicklung abzutragen. Eben so ist die Bogenlänge b, h , so abzumessen, das dieselbe der Erstreckung $b\bar{h}$ gleich wird. Gleiches gilt für die Stegbreiten.

Sind alle Caffettenhöhen hiernach auf og im Schnitte BC bestimmt, so sind die Grundrifs-Projectionen leicht anzugeben.

Sollte etwa, wie im Plane P ausgeführt ist, eine besonders geformte Caffettenanlage Platz greifen, so ist ihr Entwurf auf dem zugehörigen abgewickelten Meridianstreifen vorzunehmen und alsdann unter Einfügung von Parallelkreisen und Meridiankreisen in die Aufrifs- und Grundrifs-Projection der Kuppelfläche sorgsam zu übertragen. Die Vertiefungen der Caffetten werden wiederum mittels Hilfspyramiden ganz in der hinlänglich besprochenen Weise fest gestellt.

In der Zeichnung sind staffelförmige Caffetten dargestellt. Deshalb wurden für jede Caffette, wie bei K , bezw. k, h , zwei Hilfspyramiden in Anwendung gebracht. Die hierfür erforderlichen Aufrifs- und Grundrifs-Projectionen können nach den Angaben der Zeichnung leicht erkannt werden.

Hierbei ist nur zu beachten, das für die inneren beiden Flächen der staffelförmigen Caffetten die um I und II beschriebenen Helferzeugenden I und II zu berücksichtigen sind. Die abgewickelten inneren Flächen, wie z. B. DE und FG für die Caffette k, h , oder H und \mathcal{F} für die Caffette K , sind bei der angenommenen staffelförmigen Anordnung unter Benutzung der Erzeugenden I und II zu zeichnen.

Eine besondere, schief ange schnittene und stark unterschnittene, dreifach gestaffelte Caffetten-Anordnung ist bei der kreisrunden Kuppel des Pantheon in Rom zu bemerken. Näheres hierüber, begleitet von kritischen, sehr zu würdigenden Erörterungen ist in Theil II, Band 2 dieses »Handbuches« zu finden, worauf hier hingewiesen werden kann.

b) Stärke der Kuppelgewölbe und ihrer Widerlager.

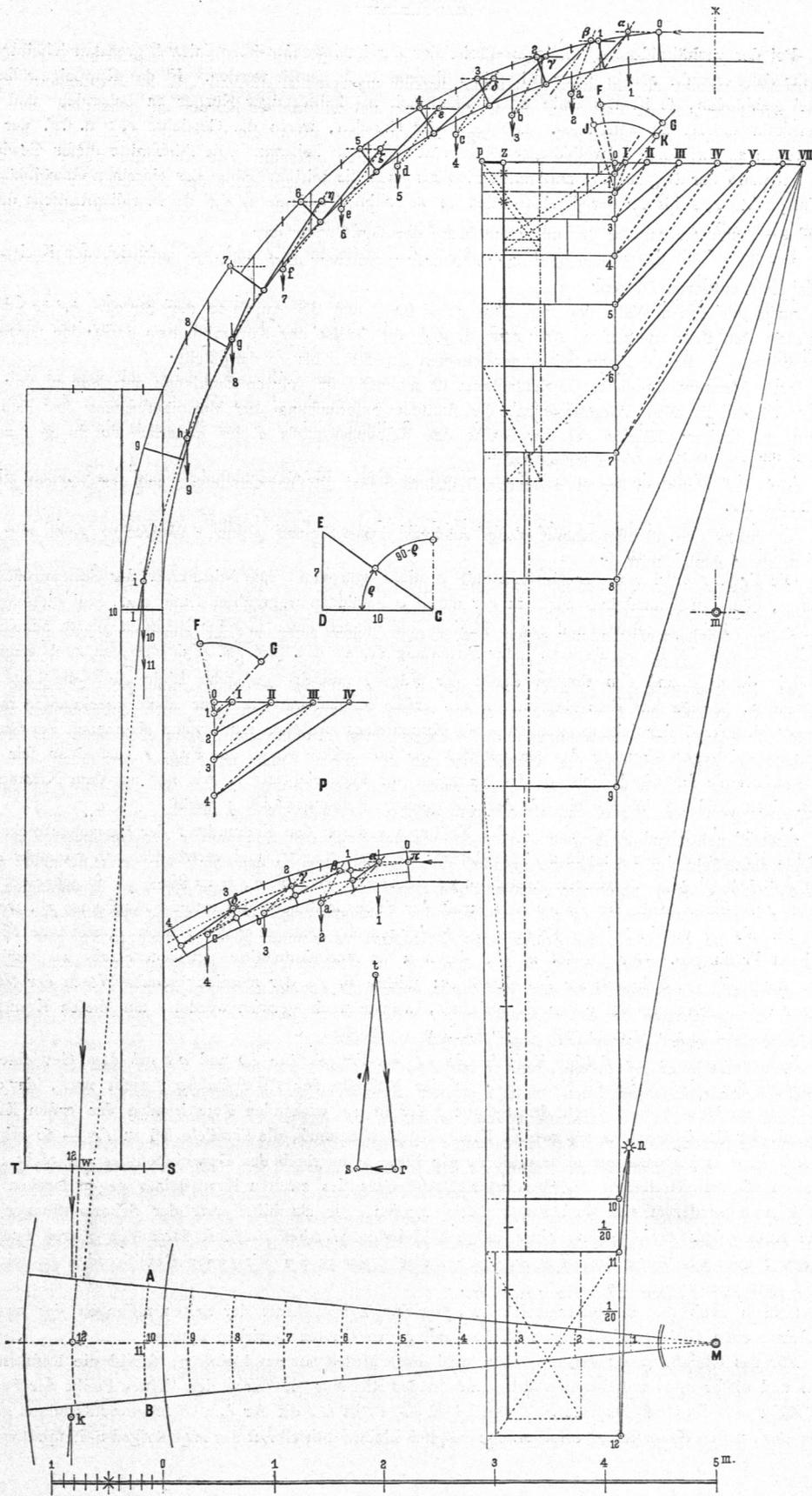
Bei der Befprechung der Stabilität der busigen Kappen der gothischen Kreuzgewölbe ist bereits in Art. 315 bis 322 (S. 460 bis 469) eine Gruppe von Grundlagen mitgetheilt, welche geradezu bei der Prüfung der Stabilität der Kuppelgewölbe ohne Weiteres wieder zu benutzen sind. Diese Grundlagen folgen dem Principe des kleinsten Widerstandes, welches *Scheffler*¹⁸⁸⁾ bewiesen hat. Hier erübrigt nur noch, unter Benutzung der oben erwähnten, bei der Prüfung der Stabilität der busigen Kappen des gothischen Kreuzgewölbes gemachten Mittheilungen, den Gang der Stabilitäts-Untersuchung des Kuppelgewölbes näher zu erläutern.

In Fig. 563 ist ein Kuppelgewölbe aus Backsteinmaterial von 10 m Durchmesser statisch untersucht. Die Erzeugende der Kuppelfläche ist als Viertelkreis gewählt. Im Scheitel des Gewölbes bleibt eine Lichtöffnung von 1 m Durchmesser. Die Stärke des Gewölbes ist vorläufig im Scheitel zu 0,25 m, am Gewölbefuse l zu 0,38 m angenommen.

Aus der Kuppel ist der Meridianstreifen mit der wagrechten Projection MAB , dessen mittlere Dicke AB in der Widerlagsfuge ro des Gewölbes 1 m beträgt, entnommen. Der nach der lothrechten Ebene Mro geführte Schnitt des Meridianstreifens ist im Aufrifs dargestellt. Diese lothrechte Ebene ist Kräfteebene. Die Bogenfläche o bis ro des Gewölbkörpers ist in 10 Theilstreifen zerlegt und für jede Theillinie nach den in Art. 143 (S. 200) gegebenen Ausführungen die zugehörige, nach m gerichtete Wölbefuge eingezeichnet.

¹⁸⁸⁾ Siehe: SCHEFFLER, H. Die Hydraulik auf neuen Grundlagen. Leipzig 1891.

Fig. 563.



Bei der verhältnißmäßigen geringen Breite der durch lothrechte Theillinien begrenzten Theilstreifen kann ihr Schwerpunkt als in ihrer Mittellinie liegend angenommen werden. Ist das Kuppelgewölbe im Scheitel geschlossen, so ist das erste obere Theilstück als keilförmiger Körper zu behandeln und sein Schwerpunkt danach zu bestimmen. Die Lage der Geraden, worin die Gewichte $1, 2$ u. f. f. der den Theilstreifen zugewiesenen Gewölbkörper wirken, ist hierdurch bekannt. Die Abschnitte dieser Gewichtslinien innerhalb der Bogenfläche bestimmen meistens auch die mittlere Höhe der einzelnen Gewölbkörper. Die Fußpunkte $1, 2$ bis 10 der Gewichtslinien auf $M10$ im Grundrisse MAB des Meridianstreifens dienen alsdann gleichfalls zur Angabe der mittleren Dicke der Gewölbkörper.

Die um M mit den Halbmessern $M1, M2$ u. f. f. zwischen MA und MB beschriebenen Kreisbogen ergeben diese mittleren Dicken.

Nach der freien Wahl der fog. Basis $p_s = 0,2^m$ und der Annahme der Strecke $s_0 = 1^m$ ist genau nach den Erörterungen in Art. 249 (S. 363) die Größe der Körperinhalte, bezw. der Gewichte der Theilstücke in der im Plane bei m gezeichneten Strecke o bis 10 dargestellt.

Unter Verwendung dieses Gewichtplanes ist nunmehr, im vollsten Einklange mit dem in Art. 315 bis 321 (S. 460 bis 467) Vorgetragenen, die statische Untersuchung des Meridianstreifens des Kuppelgewölbes anzustellen. Hierbei sei die Größe des Reibungswinkels ρ des Materials durch $\operatorname{tg} \rho = 0,7$ gegeben und als Winkel DCE aufgetragen.

Der erste Wölbstein des oben offenen Gewölbes besitzt die Gewichtslinie 1 und das Gewicht gleich der Strecke $o1$.

Die durch den höchsten Punkt o des Rückens dieses Steines geführte Wagrechte giebt mit der Gewichtslinie 1 den Schnitt α .

Die Fuge 1 wird von der Gewichtslinie 1 nicht getroffen. Die Mittelkraft der Seitenpressungen des ersten, höchsten Kranzsteines wirkt in der durch o geführten wagrechten Linie $o\alpha$. Soll diese Mittelkraft für den Gleichgewichtszustand gegen Drehen und Gleiten einen möglich kleinsten Werth annehmen, so ist ihre Größe 10 im Kräfteplane unter Beachtung des in Art. 318 (S. 463) Gefagten zu bestimmen.

Die durch α und den tiefsten Punkt der Fuge 1 punktirt gezogene Linie giebt die Lage der Resultirenden, welche aus dem Gewichte 1 des ersten Kranzsteines und der noch unbekannt in $o\alpha$ wirkenden Mittelkraft der Seitenpressungen dieses Kranzsteines entstehen muß, wenn eben noch der Gleichgewichtszustand gegen Drehung des Kranzsteines um die untere Kante der Fuge 1 vorhanden sein soll. Diese Resultirende schließt jedoch mit der Normalen zur Fugenrichtung 1 , wie sich aus dem Kräfteplane ergibt, einen größeren Winkel ein, als der fest gesetzte Reibungswinkel ρ zuläßt.

Alsdann zieht man im Gewichts- oder Kräfteplane durch den Endpunkt 1 der Gewichtsstrecke $o1$ des ersten Kranzsteines die Gerade $1F$ parallel zur Fugenrichtung 1 , und verwendet man nunmehr nach den in Art. 317 (S. 463) gegebenen Ausführungen sofort den Winkel $F1G = 90 - \rho$, so schneidet der Schenkel $1G$ eine Kraftstrecke $1o$ als Mittelkraft der Seitenpressungen des ersten Kranzsteines ab, welche größer ist, als die vorhin bei der Prüfung des Gleichgewichtszustandes gegen Drehen entstehende Mittelkraft jener Pressungen. Der parallel zu $G1$ durch α im Meridianschnitte gezogene Strahl $\alpha\alpha$ trifft die Fuge 1 innerhalb der Schnittfläche des Gewölbes; mithin ist $1o$ der möglich kleinste Werth der Mittelkraft der Seitenpressungen des ersten Kranzsteines, welche wach gerufen werden, um diesen Kranzstein im Gleichgewicht gegen Drehen und gegen Gleiten zu erhalten.

Setzt man die in $\alpha\alpha$ thätige Resultirende 11 der Seitenkräfte $1o$ und $o1$ mit dem Gewichte 12 des zweiten Kranzsteines im Gewichtplane zu der Resultirenden 12 zusammen; zieht man, da diese Resultirende im Gewölbplane durch den Schnitt α der in $\alpha\alpha$ wirkenden Resultirenden des ersten Kranzsteines mit der Gewichtslinie 2 des zweiten Kranzsteines gehen muß, die Parallele $\alpha\beta$ zu 12 — so erkennt man, daß diese in $\beta\alpha$ wirkende Mittelkraft 12 die Fuge 2 innerhalb des Gewölbchnittes gar nicht trifft. Deshalb muß zum Herstellen des Gleichgewichtszustandes des zweiten Kranzsteines gegen Drehen und gegen Gleiten wiederum eine Zusatzkraft thätig werden, die als Mittelkraft der Seitenpressungen des zweiten Kranzsteines zur Annahme eines möglich kleinsten Werthes zunächst durch den oberen Punkt 1 der Fuge 1 geht und ihren Angriffspunkt im Schnitte β der in $\beta\alpha$ wirkenden Resultirenden 12 mit der durch 1 geführten wagrechten Linie 1β erhält.

Sodann muß die zu bestimmende, in 1β wirkende Mittelkraft der Seitenpressungen des zweiten Kranzsteines eben Gleichgewicht gegen Drehen und gegen Gleiten bewirken können.

Für das Gleichgewicht gegen Drehen wird diese Mittelkraft am kleinsten, sobald die Resultirende aus 12 und dieser noch unbekannt Mittelkraft in der Richtung $\beta\beta$ durch den tiefsten Punkt der Fuge 2 geht. Zieht man im Gewichtplane $2II$ parallel zu $\beta\beta$, so ist II die für den Gleichgewichtszustand gegen Drehen des zweiten Kranzsteines erforderliche möglich kleinste Mittelkraft der zugehörigen Seitenpressungen.

Für das Gleichgewicht gegen Gleiten ist diese Mittelkraft aber so zu bestimmen, daß die Richtung der Resultirenden aus der Kraft I_2 und dieser noch unbekanntem Mittelkraft mit der Normalen zur Fugenrichtung z keinen den Reibungswinkel ρ überschreitenden Winkel einschließt.

Zieht man durch den Punkt z im Gewichtsebene die Gerade $z\mathcal{F}$ parallel zur Fugenrichtung z und verwendet man in bekannter Weise den Winkel $\mathcal{F}zK = 90 - \rho$, so ergibt sich, daß die durch β parallel mit zK geführte Gerade die Bogenfläche des Gewölbes innerhalb der Fuge z nicht trifft, daß daher zum Festsetzen der Mittelkraft der Seitenpressungen des zweiten Kranzsteines die Prüfung des Gleichgewichtszustandes gegen Drehung allein hier schon maßgebend wird.

Für alle folgenden Fugen tritt eine Berücksichtigung des Reibungswinkels nicht mehr ein (vergl. Art. 322, S. 473 und Fig. 528).

Für die Fuge \mathcal{J} kommt zunächst die in βb wirkende Resultirende II_2 in Betracht. Dieselbe setzt sich alsdann in b mit dem Gewichte $z\mathcal{J}$ des dritten Kranzsteines zu einer Resultirenden II_3 zusammen. Die Gerade γb parallel zu II_3 durch b im Gewölbeplane geführt, giebt ihre Lage für die Bogenfläche des Gewölbes. Sie schneidet die durch den oberen Punkt z der Fuge z gezogene Wagrechte in γ . Die durch γ und den tiefsten Punkt der Fuge \mathcal{J} geführte Gerade γc bedingt die Lage der für das Gleichgewicht gegen Drehen des dritten Kranzsteines eintretenden Resultirenden, deren Seitenkräfte als II_3 und als die noch zu bestimmende wagrechte Mittelkraft der Seitenpressungen des dritten Kranzsteines sich geltend machen. Zieht man $\mathcal{J}III$ im Gewichtsebene parallel zu γc , so ist $III II$ die gesuchte Mittelkraft der Seitenpressungen des dritten Kranzsteines.

Auf ganz gleichem Wege fährt man in der Zusammenfassung der für die folgenden Kranzsteine in Frage kommenden Kräfte fort, um in den Strecken $IV III$, $V IV$, $VI V$ und $VII VI$ die Mittelkräfte der Seitenpressungen für den 4., 5., 6. und 7. Kranzstein durch Zeichnung zu bestimmen. Für den 8. Kranzstein oberhalb der Fuge δ kommt eine wagrechte Mittelkraft von Seitenpressungen nicht mehr in Thätigkeit. Die in der Richtung ηg bis zur Fuge 7 auftretende Resultirende $VII 7$ setzt sich in g mit dem Gewichte 7δ des 8. Kranzsteines zu der Mittelkraft $VII 8$ zusammen. Die durch g parallel zu $VII 8$ geführte Gerade $g h$ trifft bereits die Fuge δ innerhalb der Bogenfläche, so daß schon ohne Eintritt einer Mittelkraft von Seitenpressungen in der durch den oberen Punkt 7 geführten Wagrechten für diesen Kranzstein Sicherung gegen Drehen vorhanden ist.

Das Gleiche gilt für den 9. und 10. Kranzstein.

Aus dem Kräfteplane ergibt sich in $I 1$, $II 2$ u. f. f. bis $VII 7$, $VII 8$, $VII 9$ und $VII 10$ der Reihe nach jedesmal der Druck auf die entsprechende Lagerfläche der Fugen $1, 2$ u. f. f. bis $7, 8, 9$ und 10 .

Würden diese resultirenden Drücke der Lagerfugenflächen über die äußeren, in der Rückenlinie des Meridianstreifens liegenden Fugenkanten hinausfallen oder mit der Normalen der zugehörigen Fuge von unten einen Winkel einschließen, welcher größer als der Reibungswinkel ρ ist, so ist das untersuchte Kuppelgewölbe nicht standfähig, da im ersten Falle kein Gleichgewicht gegen Drehen, im letzten Falle kein Gleichgewicht gegen Gleiten vorhanden ist.

Die Resultirende aller wagrechten Mittelkräfte der Seitenpressungen der einzelnen Kranzsteine ist gleich der Summe dieser Mittelkräfte, also gleich der Strecke $VII 0$. Sie giebt die Größe des wagrechten Schubes an, welcher vom Meridianstreifen des Kuppelgewölbes in der Widerlagsfuge 10 auf den Widerlagskörper übertragen wird.

Zu bemerken ist, daß dieser resultirende wagrechte Schub seinen größten Werth $VII 0$ bereits für die Fuge 7 erreicht hat. Die Fuge, welcher überhaupt der größte resultirende wagrechte Schub zunächst zu theil wird, heißt auch beim Kuppelgewölbe Bruchfuge oder Brechungsfuge. In der Zeichnung ist also Fuge 7 die Bruchfuge. Unterhalb der Bruchfuge müssen bei einem stabilen Gewölbe die Angriffspunkte der einzelnen Lagerfugendrucke $gh = VII 8$, $hi = VII 9$ und $il = VII 10$ für die zugehörigen Fugen $8, 9$ und 10 , wie hier der Fall ist, innerhalb der Bogenflächen bleiben.

Wird die Forderung erhoben, daß sowohl die Angriffspunkte der Lagerfugendrucke, als auch die wagrechten Linien, worin die Mittelkräfte der Seitenpressungen der einzelnen Kranzsteine wirken, das Gebiet des inneren Drittels der Bogenfläche des Meridianstreifens nicht verlassen sollen, so kann, wie der Plan P in Fig. 563 sofort erkennen läßt, die Stabilitäts-Untersuchung des Kuppelgewölbes unter Beachtung des Flächenstückes, welches dem inneren Drittel der Bogenfläche entspricht, dem Wesen nach ganz so vorgenommen werden, wie im Hauptplane gezeigt ist. Zugleich kann hierbei auf Art. 320 (S. 466) verwiesen werden.

In unmittelbarem Zusammenhange mit der statischen Untersuchung des Meridianstreifens kann die Prüfung der Stabilität des Widerlagers des Kuppelgewölbes in einfacher Weise durch Zeichnung vorgenommen werden.

Der in Fig. 563 im Grundrisse und Schnitte dargestellte Widerlagskörper ist aus 2 Theilstreifen mit den Gewichten 11 und 12 gebildet. Die Gewichtsstrecken 1011 des Theilkörpers 11 und 1112 des Stückes 12 sind im Gewichtsplane zur Vermeidung sehr langer Kräftestrecken nur in $\frac{1}{20}$ ihrer sonst erforderlichen Längen aufgetragen.

Der in der Linie il auf die Widerlagsfuge gelangende Druck $VII10$ setzt sich mit dem Gewichte 11 des unterhalb der Fuge 10 vorhandenen Widerlagstheiles zu einer durch den Schnitt i der Gewichtslinie 11 mit dem Strahle il gehenden Mittelkraft zusammen. Um diese Mittelkraft zu bestimmen, muß, da das Gewicht des Theilstreifens 11 in $\frac{1}{20}$ seiner GröÙe dargestellt ist, auch die Kraftstrecke $VII10$ nur in $\frac{1}{20}$ ihrer GröÙe benutzt werden:

Die Strecke $n10$ ist $\frac{1}{20}$ der Strecke $VII10$; mithin ist $n11$ die gefuchte Mittelkraft ebenfalls in $\frac{1}{20}$ ihrer GröÙe.

Zieht man die Gerade ik parallel zur Linie $n11$, so ergibt sich in ik die Lage der fraglichen Mittelkraft. Sie trifft die Gewichtslinie 12 im Punkte k . Die Zusammenfetzung von $n11$ und 1112 ergibt die Mittelkraft $n12$. Zieht man durch k die Gerade wk parallel zu $n12$, so ist im Strahle wk die Lage dieser Mittelkraft im Plane des Widerlagers bestimmt. Sie trifft die als fest vorausgesetzte Fußebene ST des Widerlagskörpers im Punkte w . Da der Abstand Tw hier noch etwas größer als $\frac{1}{3} ST$ gefunden ist, so ist entsprechende Sicherheit des angenommenen Widerlagers gegen Drehung vorhanden. Da die Richtung wk mit der Normalen zu ST einen Winkel einschließt, welcher weit kleiner als der Reibungswinkel ρ bleibt, so ist auch Gleichgewicht gegen Gleiten bekundet.

Will man die Stabilität des Widerlagers unter Beachtung des inneren Drittels der Bogenfläche des Meridianstreifens prüfen, so erleidet das Wesen der hierbei zu verfolgenden Schritte, welche außerdem mit der in Art. 142 (S. 197) besprochenen Bestimmung der Widerlagsstärke des Tonnengewölbes in vollster Uebereinstimmung stehen, keine Beeinträchtigung.

Auf Grund der Ergebnisse der statischen Untersuchung des Meridianstreifens des Kuppelgewölbes ist die Gewölbstärke in der in Art. 323 (S. 475) angegebenen Weise näher fest zu stellen.

Die größte wagrechte Mittelkraft der Seitenpressungen der einzelnen Kranzsteine ist die Kraft $IVIII$ der vierten Kranzschicht. Trägt man $sr = IVIII$ auf, zieht man durch r die Lothrechte zu MB und durch s die Lothrechte zu MA des Grundriffes MAB vom Meridianstreifen, so erhält man in st , bezw. tr die normalen Seitenpressungen des 4. Kranzsteines. Für alle übrigen Kranzsteine sind derartige Seitenpressungen kleiner, weil alle übrigen zugehörigen Mittelkräfte kleiner als $IVIII$ sind.

Aus praktischen Gründen, namentlich zur Vermeidung einer zu bedeutenden Zahl ungleich starker Wölbflächen, geht man für die Berechnung der von den normalen Seitenpressungen zunächst abhängigen Gewölbstärke von den größten dieser Pressungen aus. Diese normalen Pressungen $st = tr$ sind im Plane gemessen gleich $1,75 \text{ m}$. Die Basis ist $p_2 = 0,2 \text{ m}$; folglich ist die normale Pressung gleich $1,75 \cdot 0,2 = 0,35 \text{ cbm}$. Die zwischen den Fugen 3 und 4 des Meridianstreifens gegebene mittlere Breite des 4. Kranzsteines mißt $0,58 \text{ m}$.

Zur Anwendung der beim Normaldrucke bei einer Tiefe gleich 1 m abgeleiteten Gleichung 150 (S. 187) ist N für die Stofflächen des 4. Kranzsteines zu berechnen als

$$N = \frac{0,35 \cdot 1}{0,58} = 0,6 \text{ cbm}.$$

Nach der eben bezeichneten Gleichung ergibt sich für Backsteinmaterial eine Stärke

$$d_1 = \frac{1}{150} \sqrt{(540 - 0,6) 0,6} = 0,12 \text{ m},$$

d. h. gleich einer Backsteinbreite.

Der Lagerfugendruck für die Fuge 4 ist gleich $IV4$. Sieht man diesen Druck vermöge seiner nur geringen Abweichung von der normalen Stellung zur Fugenrichtung 4 sofort als zugehörigen Normaldruck an, so wird, da $IV4 = 1,25 \text{ m}$ mißt und die mittlere Dicke der Lagerfugenfläche 4 nach dem Grundrisse MAB des Meridianstreifens zu $0,5 \text{ m}$ erhalten wird, unter Beachtung der Basis $p_2 = 0,2 \text{ m}$ die Maßzahl des Normaldruckes der Lagerfuge 4 für die Tiefe gleich 1 m gefunden als

$$N = \frac{1,25 \cdot 0,2 \cdot 1}{0,5} = 0,5 \text{ cbm}.$$

Dieser Werth giebt nur eine Stärke

$$d_2 = \frac{1}{150} \sqrt{(540 = 0,5) 0,5} = \infty 0,11 \text{ m}.$$

Da fonach d_2 kleiner als d_1 wird, so ist in erster Linie die Stärke $d_1 = 0,12 \text{ m}$ zu berücksichtigen.

Für die Fuge 7 ist der Lagerfugendruck gleich $VII\ 7 = 3,1$ m und die mittlere Dicke gleich $0,8$ m; folglich wird, da ηg als Parallele zu $VII\ 7$ als Normale zur Fugenrichtung 7 beibehalten werden kann, für die Tiefe gleich 1 m berechnet

$$N = \frac{3,1 \cdot 0,2 \cdot 1}{0,8} = 0,775 \text{ cbm} = \infty 0,8 \text{ cbm.}$$

Hierfür wird die Gewölbstärke

$$d_3 = \frac{1}{150} \sqrt{(540 - 0,8) 0,8} = \infty 0,14 \text{ m,}$$

also größer als eine halbe Backsteinlänge.

Für die Widerlagsfuge 10 ist der Normaldruck nach Messung der Gewichtsstrecke $o\ 10 = 9,35$ m bei der mittleren Dicke gleich 1 m zu berechnen als

$$N = \frac{9,35 \cdot 0,2 \cdot 1}{1} = 1,87 \text{ cbm.}$$

Dieser Normaldruck erfordert eine Gewölbstärke

$$d_4 = \frac{1}{150} \sqrt{(540 - 1,87) 1,87} = 0,21 \text{ m,}$$

also nahezu eine Backsteinlänge.

Die im Vorstehenden berechneten Gewölbabmessungen sind durchweg kleiner als die in der Zeichnung angenommenen Stärken. Sie liefern gewisse Grenzwerte, welche bei einer nunmehr zum zweiten Male durchzuführenden Stabilitäts-Untersuchung des Kuppelgewölbes in Betracht zu ziehen sind.

Zu diesem Zwecke wird für den neuen Meridianstreifen, da für die Fuge 7 schon $0,14$ m Stärke eintreten müßte, bis zur Fuge 6 eine Gewölbstärke zu $\frac{1}{2}$ Backstein, von Fuge 6 bis zur Widerlagsfuge 10 dagegen eine Gewölbstärke zu 1 Backstein angenommen und nunmehr ganz in der bei Fig. 563 angegebenen Weise die Stabilitäts-Untersuchung dieses schwächeren Meridianstreifens durchgeführt.

Im vorliegenden Falle ergibt diese hier nicht weiter dargestellte Untersuchung jedoch den Ausweis, daß die Gewölbstärken im Allgemeinen und besonders in der Widerlagsfuge 10 wieder zu vergrößern sind, so daß die in Fig. 563 vorweg angenommenen Gewölbstärken zweckmäßig beibehalten werden.

Die in Fig. 563 enthaltene statische Untersuchung des Widerlagers, abhängig gemacht von den im Meridianstreifen nach gerufenen Kräften, welche zur Herstellung des Gleichgewichtszustandes einem möglich kleinsten Werthe entsprechen, liefert das Ergebnis der sicheren Standfähigkeit des Stützkörpers, da der Angriffspunkt w der letzten in Betracht zu ziehenden Resultirenden wk noch innerhalb des inneren Drittels der Stärke ST des Widerlagers liegt, da außerdem die Mittellinie des Druckes die Widerlagsfläche nicht verläßt und da endlich auch eine Gefahr des Gleitens nicht bekundet ist.

Sollte die Strecke Tw genau gleich $\frac{ST}{3}$ werden, so könnte die Breite des Theilstreifens 12 sogar noch etwas verkleinert werden.

Eine noch größere Sicherheit für die Standfähigkeit des Widerlagers läßt sich einführen, sobald, wie im Plane P von Fig. 563 angedeutet ist, die im Meridianstreifen zu ermittelnden Pressungen unter der Benutzung des inneren Drittels der Bogenfläche bestimmt und bei der fortgesetzten statischen Untersuchung des Widerlagers in bekannter Weise derart benutzt werden, daß der Angriffspunkt w den Abstand gleich ein Drittel der Widerlagsstärke von der Aufsenkante des Stützkörpers erhält.

In dem in der Zeichnung behandelten Falle ist die Stärke ST des Widerlagers gleich $1,25$ m. Der Durchmesser des betrachteten Kuppelgewölbes ist 10 m; mithin ist die Widerlagsstärke gleich $\frac{1,25}{10} = \frac{1}{8}$ dieses Durchmessers.

Der resultirende wagrechte Schub, welcher vom Meridianstreifen bei der mittleren Dicke 1 m am Fusse in der Widerlagsfuge des Kuppelgewölbes auf den

367.
Widerlags-
stärke.

368.
Fußring.

Widerlagskörper übertragen wird, kann durch einen um den Gewölbefufs gelegten eisernen Ring aufgenommen und vernichtet werden.

Durch diesen Fufsring wird die Sicherung des Gewölbefufses, bezw. die verminderte Beanspruchung des Widerlagers erreicht.

Die Berechnung des meistens rechteckig genommenen Querschnittes des Fufsringes, welcher eine Zugspannung von der Gröfse der zu vernichtenden, normal zu den Seitenebenen des Meridianstreifens stehenden Seitenkräfte des resultirenden wagrechten Schubes aufzunehmen hat, erfolgt unter Anwendung der Gleichung 249 (S. 465)

$$p = \frac{HR}{D}.$$

Hierin ist p nunmehr als Gröfse der Zugspannung, welche der Querschnitt des Fufsringes aufzunehmen hat, in Kilogramm zu bestimmen, indem zuvor der resultirende wagrechte Schub H in Kilogramm berechnet ist. Bei $\frac{R}{D}$ kann R als Halbmesser des Bogens AB der mittleren Dicke der Widerlagsfuge und D als diese mittlere Dicke selbst in Metern bleiben.

H wird in der Zeichnung, wie hier in *VIIo*, als Linie erhalten, welche die Höhe des Steinprismas vom Wölbmaterial angiebt, dessen rechteckige Grundfläche eine Länge von 1 m, aber eine Breite gleich der Basiszahl, welche beim Auftragen der Gewichtstrecken der Theilstreifen des Gewölbes benutzt wird, besitzt.

Bezeichnet B die Basiszahl (in Met.), γ das Gewicht von 1 cbm des Wölbmaterials (in Kilogr.), so wird

$$p = \frac{H \cdot 1 \cdot B \gamma R}{D} \text{ Kilogr.}$$

Ist ferner f die gefuchte Querschnittsfläche (in Quadr.-Centim.), s die zulässige Zugspannung (in Kilogr.) für 1 qcm, so ist

$$p = fs = \frac{HB\gamma R}{D} \text{ Kilogr.}$$

und folglich

$$f = \frac{HB\gamma R}{sD} \text{ Quadr.-Centim.} \dots \dots \dots 250.$$

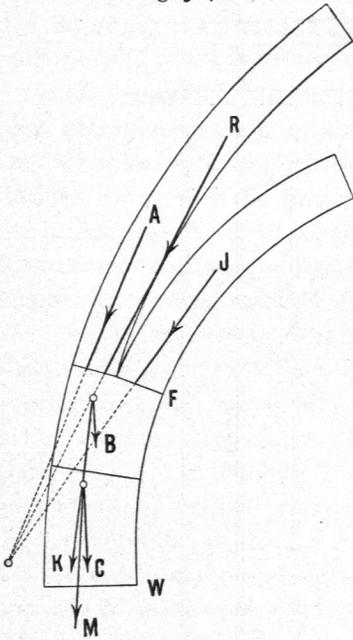
Beispiel. In Fig. 563 ist $H = VIIo$ zu 1,7 m gemessen; ferner ist $B = 0,2$ m, $\gamma = 1600$ kg, $R = 5,2$ m und $D = 1$ m; s sei = 700 kg für 1 qcm. Alsdann ist

$$f = \frac{1,7 \cdot 0,2 \cdot 1600 \cdot 5,2}{700 \cdot 1} = 4,04 \text{ qcm.}$$

Ein schmiedeeiserner Fufsring mit einem rechteckigen Querschnitte von 1 cm Breite und 4 cm Höhe würde den resultirenden wagrechten Schub vernichten.

Bei Doppelkuppeln ist die statische Unterfuchung auf dem in Art. 364 (S. 516) beschriebenen Wege für die Innen- und Aufsenkuppel besonders vorzunehmen. Vereinigen sich beide Kuppeln oberhalb ihres Gewölbefufses in einer gemeinschaftlichen Fuge F (Fig. 564), so erfolgt die getrennte statische Unterfuchung der äufseren und inneren Kuppel bis zu dieser Fuge F . Ist \mathcal{F} der resultirende Fugendruck der Innenkuppel und A der resultirende Fugendruck der Aufsenkuppel, so sind diese für die Fuge F vorhandenen Drücke zunächst zu einer Resultirenden R zusammenzusetzen, um alsdann durch ihre Vereinigung mit den Gewichten B, C u. f. f. der Theile des gemeinschaftlichen Kuppelgewölbstückes, welches zwischen der Fuge F und der

Fig. 564.



Widerlagsfuge W liegt, nach und nach unter Einführung der entstehenden Mittelkräfte K , M u. f. f. die Stabilitäts-Untersuchung zu vollenden.

Der resultierende wagrechte Schub, welcher vom Meridianstreifen der Doppelkuppel in der Widerlagsfuge auf den Widerlagskörper übertragen wird, ist gleich der Summe der sämtlichen wagrechten Mittelkräfte der Seitenpressungen der einzelnen Kranzsteine der Außen- und Innenkuppel. Die Prüfung der Stabilität des Widerlagers selbst erfolgt auch für Doppelkuppeln in der in Art. 365 (S. 519) angegebenen Weise. Eben so richtet sich die Bestimmung der Gewölbstärke beider Kuppeln nach dem in Art. 366 (S. 520) Vorgetragenen.

Die statische Untersuchung der Stütz- oder Hängerkuppel (Art. 353, S. 505) ist, wie beim gewöhnlichen Kuppelgewölbe, in der Weise durchzuführen, als zunächst ein am weitesten gespannter Meridianstreifen der Hängerkuppel, dessen mittlere lothrechte Meridianebene in den meisten Fällen durch eine Ecke des

370.
Stütz-
oder
Hängerkuppel.

als Quadrat, Rechteck oder Vieleck gegebenen Grundrisses des Gewölbes gehen muß, der erforderlichen Prüfung unterworfen wird.

Die Ergebnisse dieser Prüfung sind unmittelbar auf die weniger weit gespannten Meridianstreifen, welche natürlich in ihrer mittleren Fufsdicke im Grundkreise der Kuppel und in ihrer Belaftung, wie gewöhnlich der Fall, keine Abweichung vom Hauptstreifen aufweisen müßten, zu übertragen.

Hiernach treten dieselben Gesichtspunkte, welche in Art. 322 (S. 469) bei der Zerlegung der bufigen Kappen gothischer Kreuzgewölbe angeführt sind, im Wesentlichen wieder in den Vordergrund. Auch die Bestimmung der Gewölbdrücke, welche von den verschieden weit gespannten Meridianstreifen auf die Widerlagskörper gelangen, ist unter Beachtung des in dem bezeichneten Artikel Vorgetragenen zu treffen.

Wird das oben offene, durch den Lichtring im Scheitel begrenzte Kuppelgewölbe mit einer Laterne, dessen Träger meistens der Lichtring selbst ist, versehen, so erfährt das Kuppelgewölbe hierdurch eine besondere Belaftung, welche je nach dem Gewichte der Laterne von geringem oder erheblichem Einfluß auf die Stabilität und die Stärke des Gewölbes sein kann.

371.
Kuppel
mit
Laterne.

Wird das auf den Kranzstein des Meridianstreifens entfallende Gewicht des zugehörigen Laternenstückes durch das Gewicht eines Steinprismas des Wölbmaterials ersetzt und mit dem Gewichte des Kranzsteines vereinigt, so ist die Belaftung dieses Kranzsteines, bezw. des Theilstückes im Meridianstreifen bekannt. Die unter Beachtung dieser Belaftung einzuleitende statische Untersuchung des Meridianstreifens weicht im Wesen von den zu Fig. 563 (S. 517) gegebenen Erläuterungen nicht ab.

Ist z. B. L in Fig. 565 die lothrechte Schwerlinie des für den zu Grunde gelegten Meridianstreifen m in Frage kommenden Laternenstückes, so muß diese Linie L auch Schwerlinie oder, genau genug, die Mittellinie des ersten Theilstreifens für den zugehörigen Kranzstein bleiben.

Man hat also den Abstand a der Lothrechten L von der bekannten ersten Theillinie o zu benutzen, um durch $b = a$ die zu bestimmende zweite Theillinie i fest zu legen. Hiermit ist die Breite $a + b = 2a$ der Steinfäule gefunden, welche das Gewicht P Kilogr. des Laternenstückes ersetzen soll. Ferner ist durch die Lage von L auch die mittlere Dicke δ des zugehörigen Kranzsteines und somit gleichzeitig dieselbe mittlere Dicke δ für die Steinfäule bestimmt.

Die Grundfläche dieser Steinfäule kann mit hinlänglicher Genauigkeit als ein wagrecht liegendes Rechteck von der Länge $2a$ Met. und der Breite δ Met. angenommen werden. Das Gewicht von 1 cbm Wölbmaterial sei γ Kilogr. Die zu berechnende mittlere Höhe x Met. der Steinfäule, welche das Gewicht P Kilogr. besitzen soll, ergibt sich aus dem Ausdruck

$$2a \delta x \gamma = P$$

mit
$$x = \frac{P}{2a \delta \gamma} \text{ Met.} \quad . \quad 251.$$

Hiermit ist die Bestimmung der Belastung der Kuppel durch die Laterne getroffen. Die auf bekanntem Wege aufzufindenden Seitenpressungen und Lagerfugendrucke der einzelnen Kranzsteine geben weiteren Aufschluss über die einzuführende Gewölbstärke.

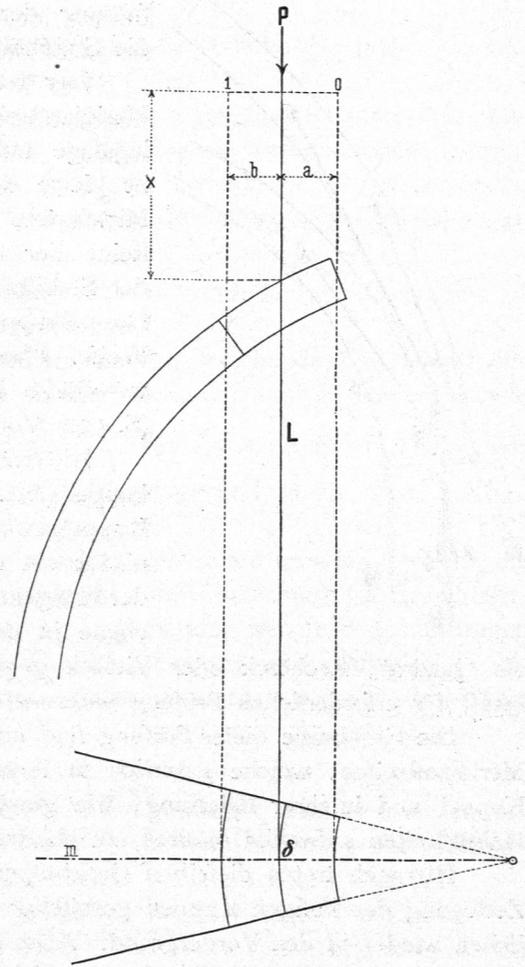
Bei bedeutendem Gewichte der Laterne können die Seitenpressungen für den oberen Kranzstein, also für den Lichtring, eine Gewölbstärke erfordern, welche unter Umständen bei der Ausführung nicht gestattet werden soll. Alsdann ist die Durchbildung der Laterne mit geringerem Gewichte nothwendig.

Wird ein Kuppelgewölbe in irgend einer Ringschicht durch ein Einzelgewicht belastet, so ist sein Einfluss auf die Seitenpressungen und Lagerfugendrucke der Kranzsteine in dem besonderen Meridianstreifen, dessen Symmetrieebene die lothrechte Schwerlinie der Einzelbelastung enthält, unter entsprechender Berücksichtigung von Gleichung 249 (S. 465) und unter Anwendung der sonst erforderlichen graphischen Ausführungen zu beurtheilen.

Frei gelegene, kräftig emporsteigende Kuppelgewölbe haben bei starken Stürmen Beanspruchungen zu erleiden, welche eine Formänderung der Kuppel und eine Aenderung der vor der Einwirkung des Windes vorhandenen Seitenpressungen und Lagerfugendrucke bewirken können.

Die genaue Bestimmung solcher Form- und Kräfteänderungen durch Winddruck ist bislang noch nicht gelungen. Man wird daher bei der statischen Unterfuchung

Fig. 565.



von Kuppelgewölben, welche neben ihrem Eigengewicht und ihrer sonstigen ruhenden Belastung noch vom Winddrucke beansprucht sind, einen Näherungsweg betreten müssen.

Die einzelnen Meridianstreifen der halben Kuppel, welche von der Windrichtung getroffen werden, erhalten durch den Winddruck ungleich große Belastungen. Der Meridianstreifen, dessen lothrechte Symmetrieebene zugleich Ebene des Windstromes ist, erfährt die größte Beanspruchung. Ermittelt man unter Berücksichtigung der in Art. 337 (S. 486) gegebenen Anleitung die auf den Rückenflächen der einzelnen Kranzsteine dieses Meridianstreifens eintretenden lothrecht stehenden, im Schwerpunkte der gedrückten Flächen angreifenden Winddrücke; setzt man dieselben einzeln mit den Gewichten und der sonst etwa vorhandenen Belastung der zugehörigen Kranzsteine zusammen, um hierdurch für jeden Kranzstein die Resultirende der ihn angreifenden äußeren Kräfte zu erhalten: so lassen sich unter nunmehriger Benutzung dieser einzelnen Resultirenden ganz im Sinne der in Art. 364 (S. 516) gegebenen Darlegungen die sämtlichen Seitenpressungen und Lagerfugendrucke des im Allgemeinen am ungünstigsten beanspruchten Meridianstreifens ermitteln und hiernach die Gewölbstärken des durch Winddruck mit belasteten Kuppelgewölbes bemessen.

Werden mehrere Kuppelgewölbe als Stutzkuppeln neben einander angeordnet und durch Gurtbogen getrennt, so kommen für die Beanspruchung dieser Gurtbogen und ihrer gemeinschaftlichen Pfeiler ähnliche Verhältnisse in Betracht, wie solche in Art. 258 (S. 381) beim Kreuzgewölbe berücksichtigt sind. Tritt in Folge von ungleich weit gespannten und ungleich belasteten Gurtbogen, die als Widerlager einzelner, neben einander gereihter Hänge- oder Stutzkuppeln von verschiedener Spannweite dienen und gruppenweise von einem gemeinschaftlichen Gurtpfeiler getragen werden, ein ungünstiger Verlauf der Mittellinie des Druckes im Pfeiler ein, so ist auch hier, wie beim Kreuzgewölbe, durch entsprechende Ausmauerung der Gewölbzwickel oberhalb des Pfeilers eine Sicherung der Stabilität des Stützkörpers einzuführen. Die statische Unterfuchung der Gurtbogen und ihrer Pfeiler erfolgt nach den bekannten Grundlagen.

Form und Belastung der Kuppelgewölbe bedingen unter Beachtung der Festigkeit und der sonstigen Eigenschaften des Wölbmaterials die Gewölbstärke. Den hierbei obwaltenden verschiedenen Verhältnissen können empirische Regeln für die Stärke der Kuppelgewölbe nicht sofort gerecht werden.

Die Ergebnisse dieser Regeln sollen im Allgemeinen nur als Ausgangswerte dienen, welche der statischen Unterfuchung und der damit zusammenhängenden Bestimmung der Stärke der Kuppelgewölbe vorläufig zu Grunde zu legen sind.

Für kleinere, mächtig belastete Kuppelgewölbe aus gutem Backsteinmaterial über quadratischem Grundriss können folgende Gewölbstärken als Ausgangswerte Berücksichtigung finden:

Spannweite bis:	4	6	8	10 Met.
Gewölbstärke im Scheitel:	$\frac{1}{2}$	1	1	1 Backstein
» am Kämpfer:	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2 »

Ähnliche Abmessungen können auch für die Stärke kleinerer Kuppelgewölbe aus Backstein über Kreisgrundrissen gewählt werden.

Für die Ermittlung der Widerlagsstärke der Kuppelgewölbe sind die nach empirischen Regeln anzunehmenden Werte gleichfalls nur als vorläufige Abmessungen anzusehen, welche für die Stabilitäts-Unterfuchung der im Querschnitte oft nach

373.
Kuppelgewölbe
zwischen
Gurtbogen.

374.
Empirische
Regeln
für die
Gewölbstärke.

375.
Empirische
Regeln für die
Widerlagsstärke.

befonderen baulichen Verhältnissen angeordneten Widerlagskörper den ersten Anhalt gewähren.

Bei verschiedenen Großconstructions der Kuppelgewölbe älterer und neuerer Zeit schwankt die Stärke der Widerlager zwischen $\frac{1}{6}$ bis etwa $\frac{1}{11}$ ihrer Spannweite.

Rondelet stellte die Regel auf, daß dem Kuppelgewölbe die Hälfte der Widerlagsstärke des Tonnengewölbes von gleicher Spannweite als Widerlager zugewiesen werden soll.

Allgemein genommen, kann man die Widerlagsstärke der Kuppelgewölbe näherungsweise zu $\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{8}$ des Kuppeldurchmessers wählen.

Wird in besonderen Fällen der in Art. 368 (S. 521) erwähnte Fußring zur theilweisen oder gänzlichen Vernichtung des in der Widerlagsfläche des Kuppelgewölbes wirkenden wagrechten Gewölbschubes angebracht, so kann die Stärke des Widerlagskörpers in geeigneter Weise herabgesetzt werden. Beruhigenden Aufschluß über die alsdann einzuführende Widerlagsstärke hat die anzustellende statische Untersuchung zu geben.

c) Ausführung der Kuppelgewölbe.

376.
Allgemeines.

Die Ausführung der Kuppelgewölbe mit über einander gelagerten concentrischen Ring- oder Kranzschichten, deren Lagerflächen durch normal zur Laibungsfläche der Kuppel gerichtete gerade Linien erzeugt werden, deren Stofsflächen lothrechten Meridianebenen des Gewölbes angehören, ist im Allgemeinen sehr einfach und in vielen Fällen bei nicht zu großen Spannweiten der Kuppeln und bei geeignetem Wölbmaterial ohne Schwierigkeiten selbst in freihändiger Mauerung zu beschaffen. Der Bildung der Lager- und Stosfugen entsprechend, erhält jeder Wölbstein im Wesentlichen eine doppelt keilförmige Gestalt.

Ueber die Ausführungsweise der Kuppelgewölbe der frühesten Zeit und der Zeit der Römer über kreisrunden und vieleckigen Räumen sind in Theil II, Band 2 dieses »Handbuches« eingehende Mittheilungen, worauf hier verwiesen werden muß, gemacht. Die dort näher gegebene Beschreibung der aus Quadern ohne oder mit Mörtel, aus Backsteinen, aus Backsteinen mit Gufsgemäuer, aus Gufsgemäuer mit Backsteinverblendung, aus Töpfen mit Gufsmauerwerk oder aus eigenartig geformten Töpfen allein hergestellten Kuppelgewölbe bietet eine Fülle von Angaben über die verschiedensten Arten ihrer Ausführung dar.

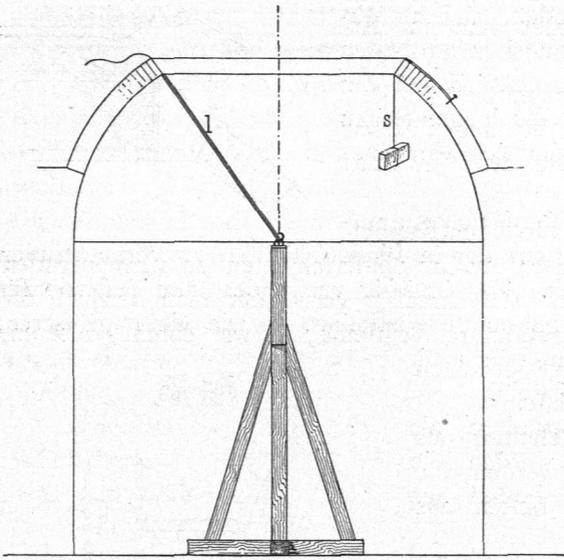
Die hauptfächlichsten Baumaterialien für Kuppelgewölbe der Jetztzeit sind gewöhnliche Backsteine, Hohl- oder Lochsteine, poröse Backsteine, Quader, lagerhafte, plattenförmige Bruchsteine, guter Kalkmörtel, verlängerter Cementmörtel oder Cementmörtel allein.

377.
Rüstungen.

Befondere Einrüstungen durch Lehrbogen mit Schalung werden wohl für größere aus Quadern oder Bruchsteinen zu wölbende Kuppeln in Anwendung gebracht. Bei Backsteinkuppeln, welche in über einander gelagerten Kranzschichten gemauert werden, ist eine derartige Einrüstung meistens nicht erforderlich.

Gehört die Laibung der Kuppel einer Kugelfläche an, so benutzt man beim Wölben die sog. Leier *l* (Fig. 566) von der Länge des Halbmessers des Kuppelgewölbes. Die Leier, eine Leiste oder Latte aus Tannenholz mit etwa 5 cm Durchmesser, ist am unteren Ende mit einem Haken in eine Oese gehängt, welche auf dem Kopfe eines fest stehenden Pfostens oder des Ständers eines Bockgerüstes genau im Mittelpunkte des Gewölbes angebracht ist.

Fig. 566.



Durch Drehen der Leier um diese Oefe wird die Lage der einzelnen Kranzschichten und die Richtung der Stofsflächen der Wölbsteine in einfachster Weise angegeben. Beim Wölben selbst muß, da vor dem vollständigen Schlusse des einzelnen Kranzringes, sobald die Neigung der unteren Lagerfläche zu groß wird, leicht ein Abgleiten der Wölbsteine eintritt, das Bestreben des Gleitens durch Verwendung eines guten, möglichst schnell bindenden Mörtels verhindert werden. In der Nähe des Gewölbefcheitels ist das Bestreben des Abgleitens am stärksten.

Das bessere Haften des einzelnen Wölbsteines einer zu vermauern-

den Kranzschicht auf seiner Lagerfläche wird zweckmäsig durch eine besondere Belastung des immer zuletzt versetzten Steines unterstützt. An einem Nagel, der in einer tief gelegenen Fuge am Rücken des Gewölbes eingeschlagen ist, wird eine Schnur *s* befestigt. Das andere Ende dieser Schnur wird mit einem Gewichte, gewöhnlich mit einem Backstein verbunden. Die über den Wölbstein gelegte Schnur beschleunigt mittels des Gewichtes des frei im Inneren des Gewölbes herabhängenden Backsteines feine Mörtelvermittlung auf der Lagerfläche.

Sind beim Einwölben mehrere Arbeiter thätig, so wird von jedem derselben statt der Leierlatte eine an der Oefe des Ständers befestigte Schnur, auf welcher die Länge des Kugelhalbmessers genau bezeichnet ist, als Richtschnur für die Lager- und Stofsugen des Gewölbes benutzt.

Bei größeren Kugelgewölben, namentlich aber bei Kuppelgewölben, für deren Erzeugende der Mittelpunkt auferhalb der lothrechten Scheitelaxe der Gewölbfläche gewählt ist, werden Leier, bezw. Schnüre nicht gebraucht. An ihre Stelle tritt ein um die Scheitelaxe drehbarer, möglichst einfach hergerichteter Lehrbogen oder unter Umständen die Einrüstung durch eine Schar von radial gestellten Lehrbogen mit Schalung.

Bei der Verwendung der gewöhnlichen Backsteine, der Hohl- oder Lochsteine oder der porösen Backsteine zur Wölbung der Kuppeln ist unter der Voraussetzung, daß nur gutes Material benutzt wird, die der Gewölbfläche entsprechende richtige Stellung der Lager- und Stofsflächen beim Wölben der Kranzschichten streng zu beachten. Die durch Wasser angefeuchteten Steine werden mit gut und hinlänglich schnell bindendem Mörtel (verlängerter Cementmörtel, bezw. reiner Cementmörtel) versetzt. Da jeder Stein, genau genommen, doppelt keilförmig sein soll, so muß ein entsprechendes Zuhauen der Steine vorgenommen werden. Bei kleineren Gewölben ist dieses Zuhauen kaum zu vermeiden. Bei größeren Gewölben beschränkt sich das Zuhauen in der Regel nur auf die Stofsflächen der Ringschichten, da bei den Lagerflächen die keilförmige Ausgleichung oft schon durch die Mörtelfüllung erzielt werden kann. Im Ganzen soll aber bei sorgfältiger Ausführung dem fach-

378.
Kuppelgewölbe
aus
Backsteinen.

gemäßen Zurichten der Wölbsteine Rechnung getragen werden. In den meisten Fällen wendet man zur Erzielung richtiger Lager- und Stosfugenflächen am besten nur Binderschichten an, weil sonst, namentlich bei den Kränzen mit geringerem Durchmesser, die langen Seiten der Backsteine sich der Laibungsfläche des Gewölbes nicht gut anpassen können.

In der Nähe des Scheitels des geschlossenen Kuppelgewölbes wird das keilförmige Zuschärfen der in Binderschichten zu vermauernden gewöhnlichen Backsteine etwas misslich. Zweckmäßig verwendet man deshalb für die oberen Kranzschichten besonders gebrannte Keilsteine, so wie einen größeren, entsprechend geformten und gebrannten, oder auch aus einem Quader bearbeiteten Schlufsstein.

Oben offene Kuppelgewölbe erhalten als Abschluss einen Lichtring. Hierfür werden die Wölbsteine, wie Fig. 567 zeigt, am besten aus gutem Quadermaterial angefertigt.

Zur Vermeidung einer erheblichen Belastung des unteren Theiles eines größeren Kuppelgewölbes und seines Widerlagers durch volle Hintermauerung zwischen dem Rücken des Gewölbes und der Innenseite des etwa noch reichlich hoch über der Kämpfer Ebene der Kuppel aufzumauernden Widerlagskörpers bringt man oft sog. Sporen an. Die zwischen diesen Sporen *a* (Fig. 568) entstehenden Hohlräume oder Zellen vermindern das Gewicht der eigentlichen Hintermauerung in erwünschtem Maße.

In gleicher Weise können solche Sporen am Fulse der Mauerung der Doppelkuppeln zwischen der äußeren und inneren Kuppelschale angebracht werden.

Läßt man unter Beachtung gleich großer Theilweiten des Kuppelfulses rippenartig nach dem Scheitel oder dem Lichtkranz der Kuppel ansteigende Wölbstreifen mit größerer Stärke als die dazwischen liegenden Gewölbstücke besitzen, ausführen, so entstehen die sog. Verstärkungsurte der Kuppel. In der Regel treten diese etwa durchweg $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stein breiten Verstärkungsurte um $\frac{1}{2}$ Steinfärke an der Rückenfläche des Gewölbes vor.

Als lehrreiches Beispiel eines Kuppelgewölbes mit Verstärkungsurten und mit zweckmäßiger Einführung eines Fußsringes zur Vernichtung des für den Widerlagskörper nachtheiligen wagrechten Gewölbschubes ist die über der kreisrunden Vorhalle des städtischen Bades zu Karlsruhe von *Durm*¹⁸⁹⁾ ausgeführte

Fig. 567.

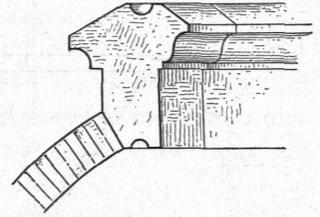


Fig. 568.

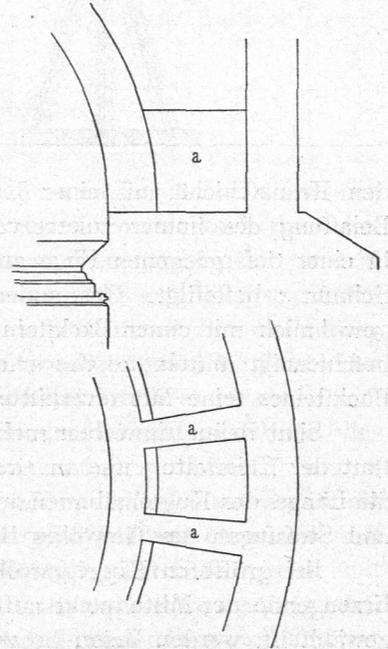
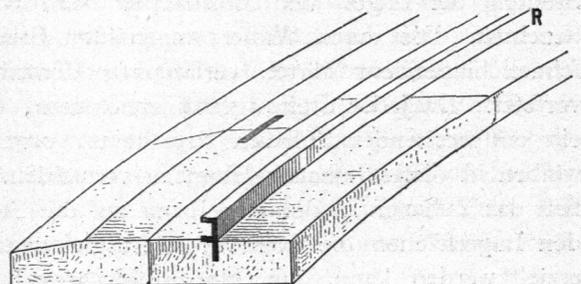


Fig. 569.



379.
Sporen.

380.
Verstärkungsurte.

¹⁸⁹⁾ Siehe: Zeitschr. f. Bauw. 1874, S. 123.

Kuppel mit Lichtring zu betrachten. In Fig. 569 ist für diese Kuppel die Anordnung des in einem Kranz von Sandsteinquadern eingelassenen, mit Blei vergossenen schmiedeeisernen Fußringes *R* veranschaulicht.

Bei elliptischen Kuppelgewölben sind die Lagerfugenkanten der einzelnen Kranzschichten Ellipsen, welche durch Schnitte wagrechter Ebenen mit der Gewölbelaubung erhalten werden. Die Lagerfugenflächen der Wölbkränze bilden windtschiefe Flächen, erzeugt durch gerade Linien, welche in jedem Punkte der zugehörigen Lagerfugenkante normal zur Oberfläche des Ellipsoids der Kuppel stehen und in Folge hiervon verschiedene Neigung zur wagrechten Ebene annehmen.

Beim Mauern der Wölbkränze kann übrigens das Windtschiefe der Lagerflächen durch entsprechende Stärke der Mörtelfüllung ohne erhebliche Nachteile für die Wölbung ausgeglichen werden.

Die Stofsflächen liegen in Meridianebenen, welche durch die lothrechte Scheitelaxe der elliptischen Kuppel geführt werden.

Um während der Ausführung elliptischer Kuppelgewölbe die richtige Bildung der Laibungsfläche und die genaue Stellung der Lager-, bzw. Stofsflächen aufrecht zu erhalten, sind, von der lothrechten Hauptaxe der Kuppel strahlenförmig auslaufend, mehrere Lehrbogen aufzustellen, deren äußere Begrenzungslinien nach den ihnen zukommenden Meridianschnitten zu bestimmen sind.

Die Mauerung caffettirter Kuppelgewölbe in einzelnen Kranzschichten, wobei die Kranztheile der Caffetten nur in geringerer Stärke, als die Caffettenstege auszuführen sind, erfolgt wie bei den nicht caffettirten Kuppelgewölben.

Ist unter besonderen Verhältnissen bei diesen Gewölben eine vollständige Einrichtung mit Schalung nothwendig, so sind für die Caffetten Holzkaften als Hilfsrüttung auf der Schalung zu befestigen. Diese Holzkaften sind im Allgemeinen in der in Art. 163 (S. 234) beschriebenen Weise anzufertigen.

Die Ausführung der Hänge- oder Stutzkuppeln weicht von der Herrichtung der vorhin besprochenen Kuppelgewölbe nicht ab.

Befondere Beachtung verdienen jedoch die bei diesen über quadratischen, recht- oder vieleckigen Räumen eintretenden Stutzkuppeln in Frage kommenden Eckzwickel oder Pendentifs, deren Gestaltung in Art. 353 bis 355 (S. 505 bis 507) näher gekennzeichnet ist.

In aller Strenge ist der Fuß des Eckzwickels eine gerade Linie, wenn nicht, wie z. B. bei der Kuppel der Peters-Kirche in Rom, veranlaßt durch eine besondere Grundrißbildung der Widerlagskörper des Gewölbes, die Eckzwickel *z* nach Fig. 570 eine ausgebreitete Grundfläche erhalten.

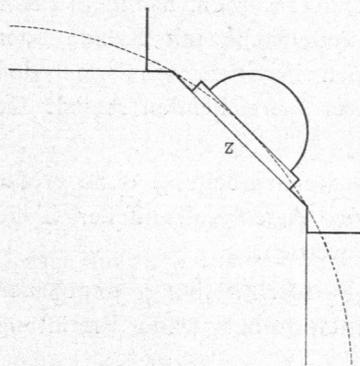


Fig. 570.

Zur Vermeidung des in einer Schneide auslaufenden Ansatzes der Eckzwickel wird auch bei Hängekuppeln aus Backsteinmauerwerk als Anfänger dieser Zwickel am besten ein größerer, regelrecht bearbeiteter Quader (Fig. 571) versetzt, welcher dem unteren Backsteinringe ein geeignetes Auflager bietet. Ausserdem kann aber auch in nicht unzweckmäßiger Weise die Aufmauerung der Gewölbzwickel

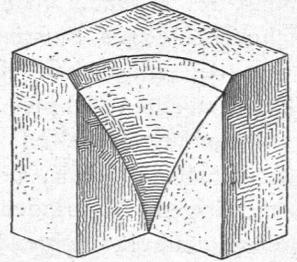
381.
Elliptische
Kuppeln.

382.
Caffettirte
Kuppelgewölbe.

383.
Hänge-
oder
Stutzkuppeln;
Pendentifs.

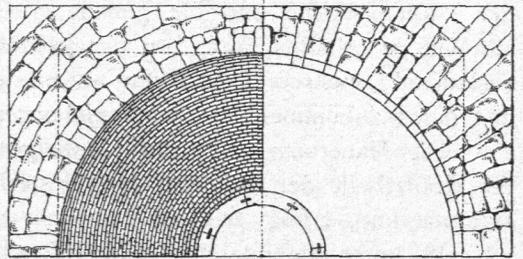
in wagrechten Schichten mit allmählicher, der Laibungsfläche des Gewölbes entsprechender Vorkragung, wie Fig. 572 angiebt, vorgenommen werden. Die Stosflächen dieser Zwickelmauerung werden nach lothrechten Meridianebenen der Kuppel geordnet. In dieser Weise wurden von *Moller* die Pendentifs der Kuppelgewölbe über den Treppenhäusern im Theater zu Mainz ausgeführt.

Fig. 571.



Vorkragungen *C* in wagrechten Schichten mit darüber gelegten, nach und nach vorgeschobenen Mauerbogen *A, B* zeigt die Pendentif-Anordnung in Fig. 573. Hierbei entsteht zwischen der Aufmauerung *C* und dem unteren Mauerbogen *A* eine besonders zu schließende grössere Fuge *k*. Zwischen dem höchsten Mauerbogen *1234* und dem hier aus Quadern angenommenen Fufskranze der nach Art. 354 (S. 506) gestalteten Oberkuppeln bleiben bei *2* im Grundrisse nur noch kleine Zwickelstücke, welche durch wagrechte Schichten mit Vorkragung oder durch Ringfichten geschlossen werden können.

Fig. 572.



Im Allgemeinen zeigt diese Herstellung der Pendentifs, welche in ähnlicher Weise z. B. bei den Kuppeln der Marcus-Kirche in Venedig vorkommt, einige Nachteile. Der Schub der Mauerbogen *A, B* u. f. f. bewirkt für die Gurtbogen der Stirnseiten der Unterkuppel eine ungünstige Beanspruchung welche leicht eine Verdrückung und Verdrehung der Gurtbogen im Gefolge haben kann.

Wird zwischen den Pendentifs und der Oberkuppel der fog. Tambour, welcher als cylindrischer, röhrenförmiger Mauerkörper nur einen erhöhten Fuf für die Oberkuppel bildet, eingefügt, so setzt sich dieser Tambour unmittelbar auf die von den Pendentifs getragene erste Kranzschicht.

Die Einrüstung für das Wölben der Hängekuppeln kann, falls nicht sehr große Spannweiten in Betracht kommen, auf die in der Richtung der Diagonalen des zu überwölbenden Raumes aufzustellenden Lehrbogen beschränkt werden, nachdem zuvor am Mauerwerk der Stirnseiten die Stirnlinien der Kuppelfläche mit Kreide oder Kohle genau aufgezeichnet sind. Diese Stirnlinien geben in Gemeinschaft mit den Rückenlinien der Diagonal-Lehrbogen für geübte Maurer hinreichenden Anhalt für die regelrechte Ausführung des Gewölbes.

Gute und lagerhafte Bruchsteine, wenn deren einfache Bearbeitung ohne große Mühe zu erreichen ist, namentlich aber die leichteren Arten vulcanischer Tuffe können zur Herstellung der Kuppelgewölbe gebraucht werden.

Die Ausführung der Wölbung folgt den für Backsteinwölbung gegebenen Grundlagen. In den meisten Fällen wird bei Bruchsteinwölbung eine Einrüstung durch Lehrbogen mit Schalung erforderlich.

384.
Kuppel
mit
Tambour.

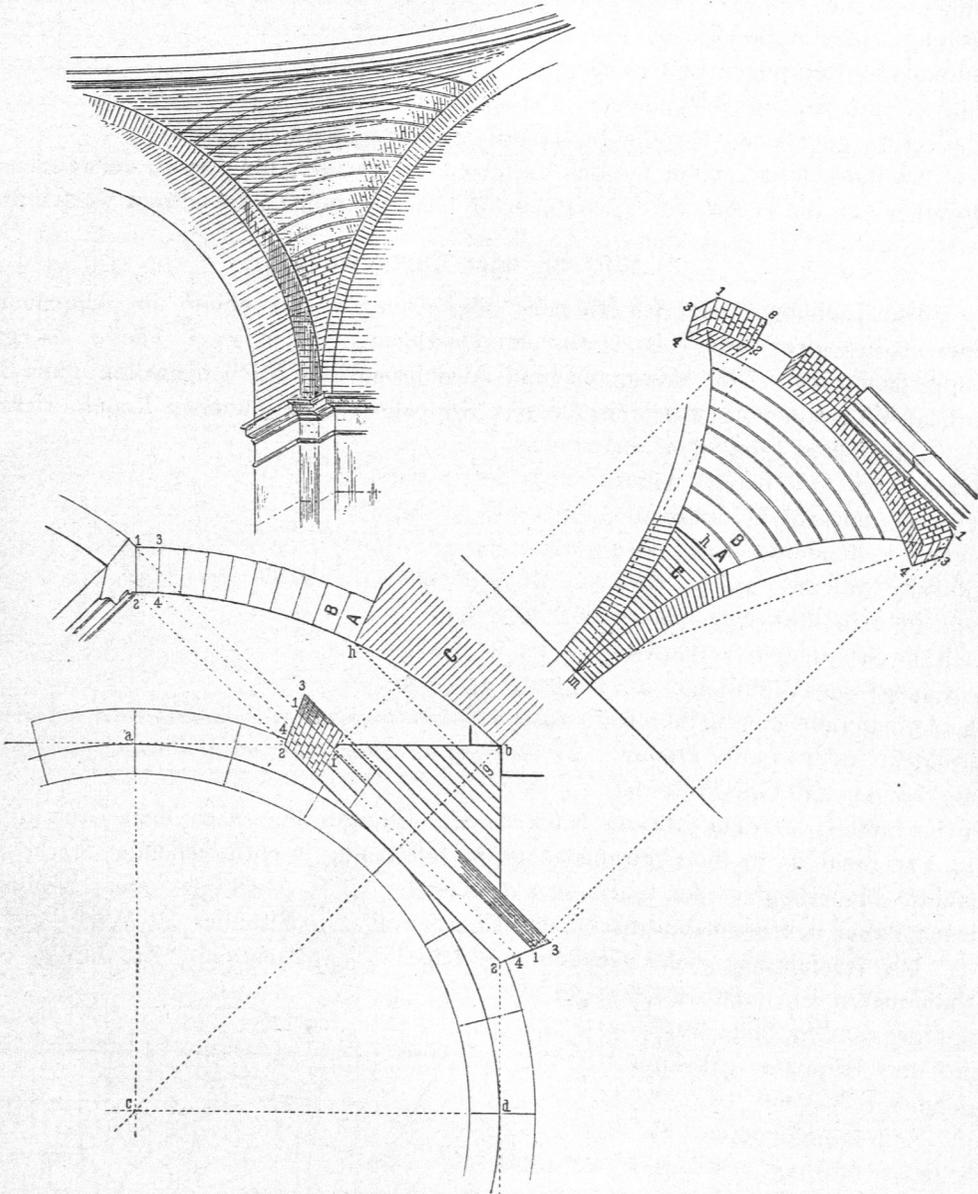
385.
Einrüstung.

386.
Kuppelgewölbe
aus
Bruchsteinen.

Kuppelgewölbe aus Quadern werden gleichfalls in über einander gelagerten Kranzschichten hergestellt. Die stets zu beachtende Bestimmung, wonach die Erzeugenden der Lagerflächen der Wölbsteine normal zur Laibungsfläche der Kuppel stehende gerade Linien sein sollen, während die Stofsugenflächen in Meridianebenen

387.
Kuppelgewölbe
aus
Quadern.

Fig. 573.



liegen müssen, welche durch die lothrechte Scheitelaxe des Gewölbes gelegt werden, bedingt den Fugenschnitt der Wölbquader.

Die Stofsugen sind bei den über einander liegenden Kranzen nach Fig. 574 in gegenseitigen, auf Kuf geordneten Verband zu bringen. Die Ausmittlung der

Brettungen der Kranzsteine ist nach den einfachsten Lehren der darstellenden Geometrie vorzunehmen. Außerdem ist die Bearbeitung der Wölbsteine nicht schwierig.

Die Ausführung der Wölbung, welche meistens unter Benutzung einer vollständigen Einrichtung mit Lehrbogen und Schalung erfolgt, ist im Allgemeinen den vorhin gegebenen Regeln der Backsteinwölbung entsprechend.

Im Besonderen gelten für das Versetzen der Quader, für den zu verwendenden Mörtel u. f. f. die in Art. 170 (S. 246) beim Tonnengewölbe angeführten Vorschriften.

d) Nischen- oder Chorgewölbe.

Die Laibungsfläche des Nischen- oder Chorgewölbes gehört im Allgemeinen einer Hälfte der durch eine lothrechte Meridianebene in zwei Theile zerlegten Kuppelfläche an. Die Anordnung und Ausführung der Nischengewölbe muß sich also im Wesentlichen nach den für das Kuppelgewölbe geltenden Regeln richten.

Abgesehen von den in Art. 220 (S. 328) bereits näher besprochenen, als Ecküberführungen behandelten Eck- oder Nischengewölben, welche übrigens in dem dort Angeführten auch die Grundlagen für die Ausmittelung der Wölbsteine aus Quadermaterial über halbkreisförmigem oder sonst krummlinig begrenztem Grundrisse der Nische bieten, werden größere Nischen- oder Chorgewölbe nach dem Grundriß in

Fig. 575 meistens in ihrer Stirnfläche gegen selbständig in entsprechender Stärke ausgeführte Mauerbogen oder Gurtbogen *a* gesetzt. Diese Abschluß- oder Stirnbogen dienen dabei der Stirnschnittfläche des Chorgewölbes unmittelbar als Widerlager.

Die Ausführung dieser Gewölbe, gleichgiltig ob Backstein-, Bruchstein- oder Quadermaterial benutzt wird, folgt genau den beim Wölbten der Kuppeln gekennzeichneten Wegen.

Soll in besonderen Fällen bei größeren, aus Quadern herzustellenden Chorgewölben ein nach Fig. 576 gebildeter Fugenschnitt gewählt werden, welcher ohne Anwendung eines selbständigen Abschlußbogens die

Fig. 574.

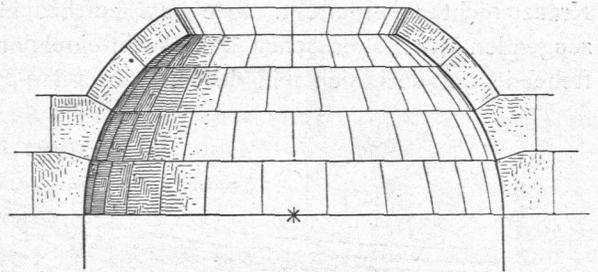


Fig. 575.

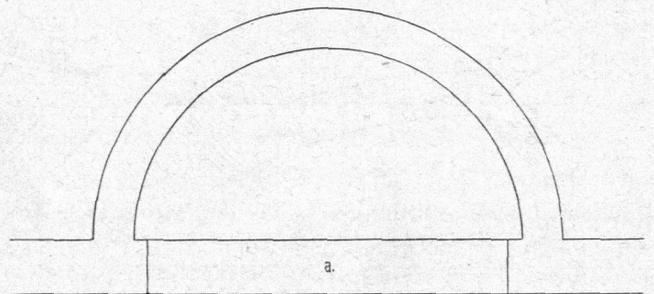
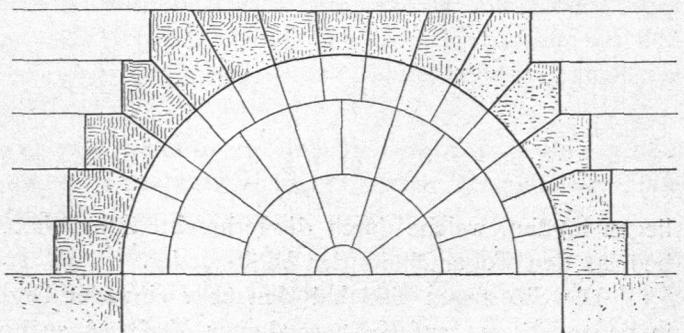


Fig. 576.



388.
Allgemeines.

389.
Ausführung.

Wölbung ohne Einführung von Kranzschichten mit wagrechten Lagerkanten gestattet, so entspricht diese Anordnung hinsichtlich der Ausmittlung des Fugenschnittes im Allgemeinen dem in Art. 220 (S. 328) Vorgetragenen.

Sollen Chorgewölbe caffettenartig gegliedert werden, so ist das in Art. 382 (S. 529) Gefagte gleichfalls zu befolgen.

Eben so entsprechen ihre Stabilitäts-Untersuchung und die Bestimmung ihrer Gewölbstärke den hierüber beim eigentlichen Kuppelgewölbe gemachten Angaben.

17. Kapitel.

Böhmische Kappengewölbe.

a) Gestaltung der böhmischen Kappengewölbe.

Die Laibungsfläche des böhmischen Kappengewölbes entspricht derjenigen einer flachen Stütz- oder Hängekuppel. Im Gegensatz zum preussischen Kappengewölbe, dessen Wölbfläche einem Cylindermantel angehört, besitzt das böhmische Kappengewölbe eine sphärische oder sphäroidische Laibungsfläche.

Das böhmische Kappengewölbe, auch böhmische Kappe, in Oesterreich Platzelgewölbe genannt, kann über regel- oder unregelmäßig gestalteten Grundrissen in Anwendung kommen. Regelmäßige Grundrisse haben aber die einfachere und schönere Entwicklung der Form dieser Gewölbe im Gefolge.

Das böhmische Kappengewölbe ist zur Herichtung einer massiven Decke mit geringer Pfeilhöhe und mäfsiger Stärke vorzüglich geeignet. In

der Regel wird jedoch, um die Gewölbstärke nicht über $\frac{1}{2}$ Backsteinlänge zu steigern, die größte Gewölbeweite selten über 5 m genommen. Die Pfeilhöhe wird zu $\frac{1}{8}$ bis $\frac{1}{12}$, meistens zu $\frac{1}{10}$ der Länge der größten Diagonale der Grundrisfigur des zu überwölbenden Raumes gewählt.

Die Stirnbogen, also die an allen Umfangsmauern des Raumes auftretenden Kämpferlinien des böhmischen Kappengewölbes (Fig. 577) sind Flachbogen.

Hierdurch wird die Anlage von größeren Thür- oder Lichtöffnungen in den Widerlagsmauern erleichtert oder auch nach Fig. 578 bei mehrfach an einander gereihten Gewölben die Auflöfung der Widerlagsmauern in Eckpfeiler mit dazwischen gespannten Gurtbogen, deren Wöblinien den Stirnbogen *a*, *b* zweckmäßig angepaßt werden, in einfacher Weise möglich.

Für die Darstellung der Laibungsfläche des böhmischen Kappengewölbes ist, abge-

390.
Form.

Fig. 577.

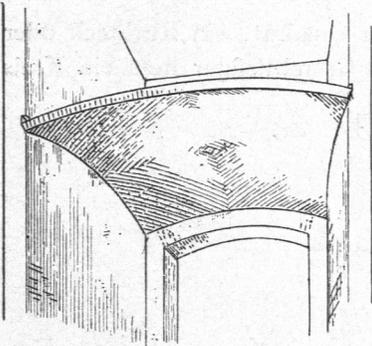
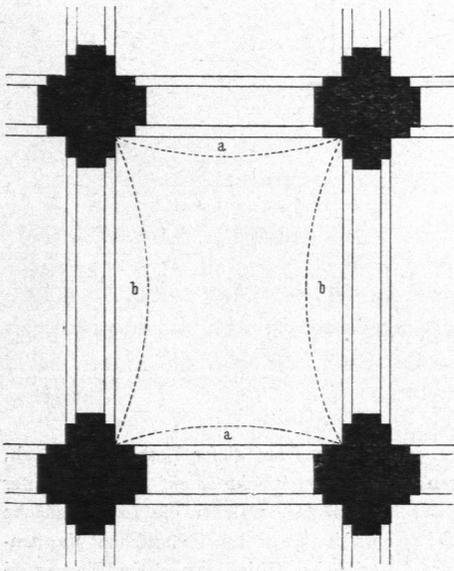


Fig. 578.



391.
Darstellung.