

2.3 Ausgewählte Eigenschaften von Kuppeln.

2.3.1 Gewölbe und Kuppeln als Elemente der Raumhülle mit raumüberdeckender und lastabtragender Funktion.

Seit altersher stellt sich beim Bauen den Menschen die Aufgabe, Räume nach oben hin abzuschließen, um Schutz vor der Witterung geben, Geborgenheit erzielen und Räume funktional übereinander stapeln zu können. Alle dabei möglichen zur Anwendung kommenden raumüberdeckenden Elemente erfüllen aus architektonischer Sicht raumbildende und aus statisch-baukonstruktiver Sicht eigen- und auflastabtragende Funktionen.¹ Die raumüberdeckenden Elemente sind Teil der Raumhülle und damit Bestandteil der Architekturform. Durch den zugewiesenen Auftrag des Eigen- und Auflastabtrages sind sie außerdem Elemente der Strukturform.²

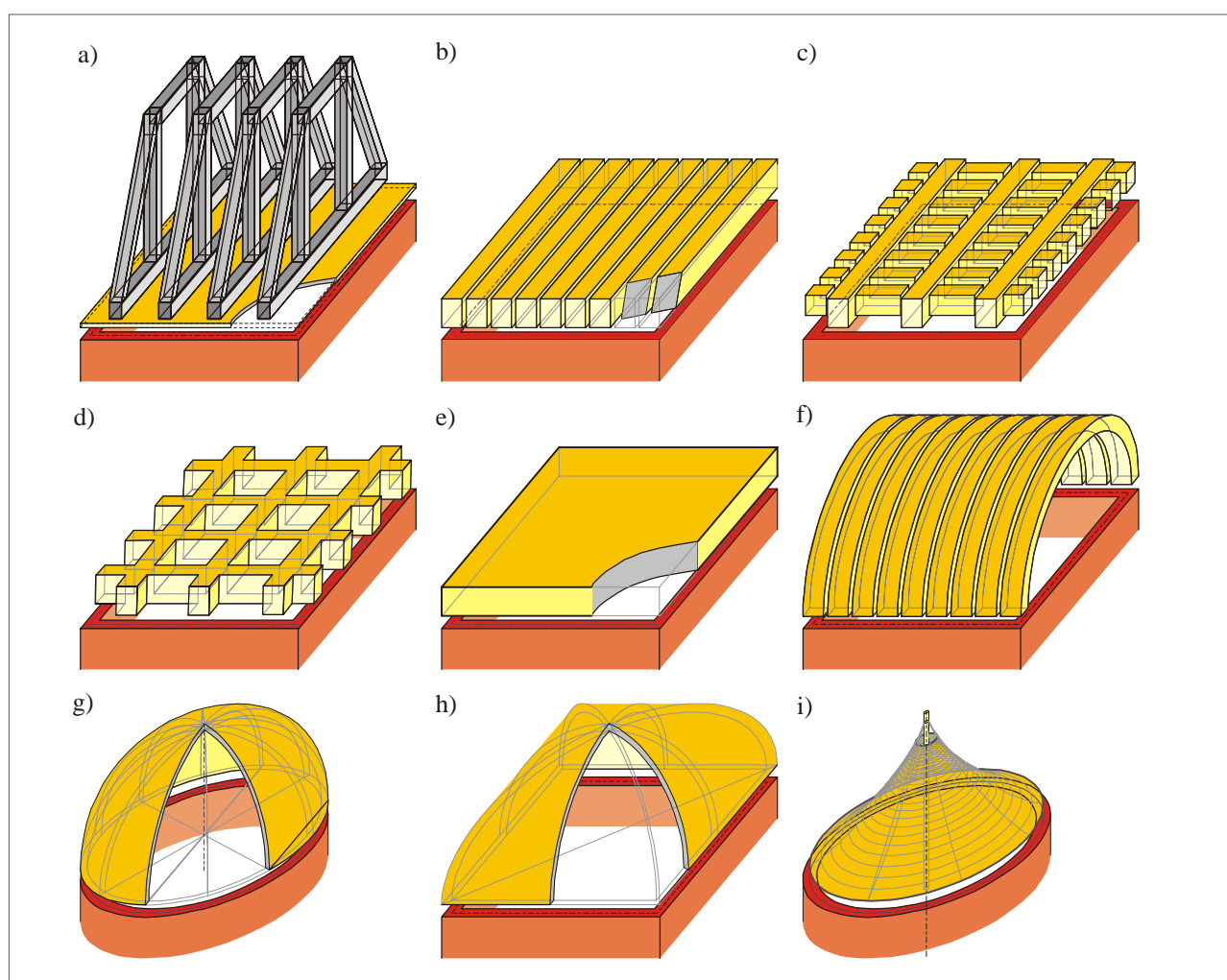


Bild 2.3.1: Gegenüberstellung raumüberdeckender Elemente
 a) Nicht selbsttragendes raumüberdeckendes Element - abgehängte Decke.³ b-i) Selbsttragende raumüberdeckende Elemente. b) Balkentragwerk. c) Balkentragwerk mit Primär- und Sekundärträgern. d) Trägerrost. e) Plattendragwerk. f) Bogentragwerk (Tonnengewölbe). g) Kuppeltragwerk. h) Kreuzgewölbe. i) Zeltdach mit Pylon.

¹ Vgl. Bild 2.3.1.

² Vgl. Abschnitt 1.1.

³ Die den Raum bildende Decke wird an einer hinter ihr versteckten Tragkonstruktion, beispielsweise an Strebenwerken, aufgehängt (aussteifende Elemente nicht dargestellt).

Für die dabei zur Anwendung gelangenden Konstruktionselemente Platte und Gewölbe gilt, daß an jedem beliebigen ihrer Orte eine Traggliedabmessung⁴ klein gegenüber den beiden anderen ist. Balken hingegen weisen zwei kleine Dimensionen⁵ gegenüber der Spannweite auf, sie sind daher erst in mehrfacher Kombination in der Lage, eine raumüberdeckende Fläche zu bilden. Die Lastabtragung in diesen Bauwerksteilen kann prinzipiell auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen: unter der Aktivierung von Querkraften und Biegemomenten in Balkenkombinationen und Platten sowie unter der Aktivierung von Normalkraften in Gewölben. Die Baupraxis führt selbstverständlich infolge der Unvereinbarkeit der mathematisch-theoretisch angenommenen und der real unter baukonstruktiven Erfordernissen ausführbaren Randbedingungen zu Mischformen, wobei in der Regel eine der beiden Grundformen dominierend ist.

2.3.2 Kuppeln als Sonderform der Gewölbe.

Eine Sonderform der Gewölbe wiederum sind die Kuppeln. Der Begriff Kuppel erfährt in der einschlägigen Literatur eine im Detail divergierende Definition. Diese zeigt sich auch im allgemeinen sprachlichen Gebrauch des Wortes. Die Begriffsbestimmungen reichen von „... *eine sphärisch geformte Raumabdeckung über vorwiegend kreisrundem Grundriß, ohne Biegespannungen, die dadurch wie ein Gewölbe gemauert oder aus Gußmaterial gefertigt, aber auch aus leichten Baustoffen zusammengesetzt sein kann. Sie zählt zu den bedeutendsten Großkonstruktionen der bisherigen Baugeschichte sowohl hinsichtlich ihrer Raumwirkung als auch ihrer äußeren Erscheinung und beherrschenden Stellung im Städtebau ...*“⁶ über „... *Gewölbe mit regelmäßiger Krümmung ...*“⁷ bis zu „... *sphärisches Gewölbe zur Überspannung eines kreisförmigen oder quadratischen Raumes. Ihre Wölbflächen entstehen durch Drehung eines Halbkreises, Ellipsen-, Parabel- oder Spitzbogens um eine Vertikalachse oder aus einem Vieleck von Walmkappen. ...*“⁸

ERWIN HEINLE und JÖRG SCHLAICH hingegen führen als Definition für Kuppeln an: „*Kuppeln sind doppelsinnig gekrümmte Überwölbungen von Räumen mit runden und vieleckigen Grundrissen ...*“⁹ und verweisen damit formal auf eine besondere Eigenschaft von Kuppeln: Ihre Mittel- und Oberflächen haben offensichtlich eine doppelte GAUßsche Krümmung^{10 11}.

Kuppeln eignen sich hervorragend zu einer stützungsfreien Überdeckung großer Räume. Sie zählen daher zu den weitspannenden Tragwerken, ihre Anwendung wird aber nur besonderen Bauvorhaben vorbehalten sein. Daher erfordert ihre Gestaltung eine besonders feinfühlige

⁴ Dicke von Platte und Gewölbe.

⁵ Dicke und Breite des Balkens.

⁶ Olbrich, 1987, hier Band 2.

⁷ Müller & Vogel, 1994.

⁸ Grill, 1994, hier Band 5.

⁹ Heinle & Schlaich, 1996.

¹⁰ Die GAUßsche Krümmung definiert sich als das Produkt der Hauptkreiskrümmungen. Kuppeln haben damit eine positive GAUßsche Krümmung, während die GAUßsche Krümmung für einen Tambour über einem kreisrunden Grundriß (Zylinderschale) gleich Null ist.

¹¹ Genau genommen bekrönt beispielsweise nach dieser Definition den florentiner Dom Santa Maria del Fiore keine Kuppel. Es findet sich dort über oktagonalem Grundriß ein Klostergewölbe, daß aus einfach gekrümmten Segmenten zusammengesetzt in seiner Gesamtheit rippenverstärkt ein Faltwerk ergibt. Trotzdem ist dieses Bauwerk in der Literatur und auch in unserem Bewußtsein als Kuppel verankert, so auch bei HEINLE und SCHLAICH, vgl. Heinle & Schlaich, 1996, S. 89.

Herangehensweise, da Kuppeln in ihrer ästhetischen Wirkung auf den Binnenraum, auf die äußere Ansicht des Gebäudes und auf den gesamten Stadtraum ausstrahlen.¹²

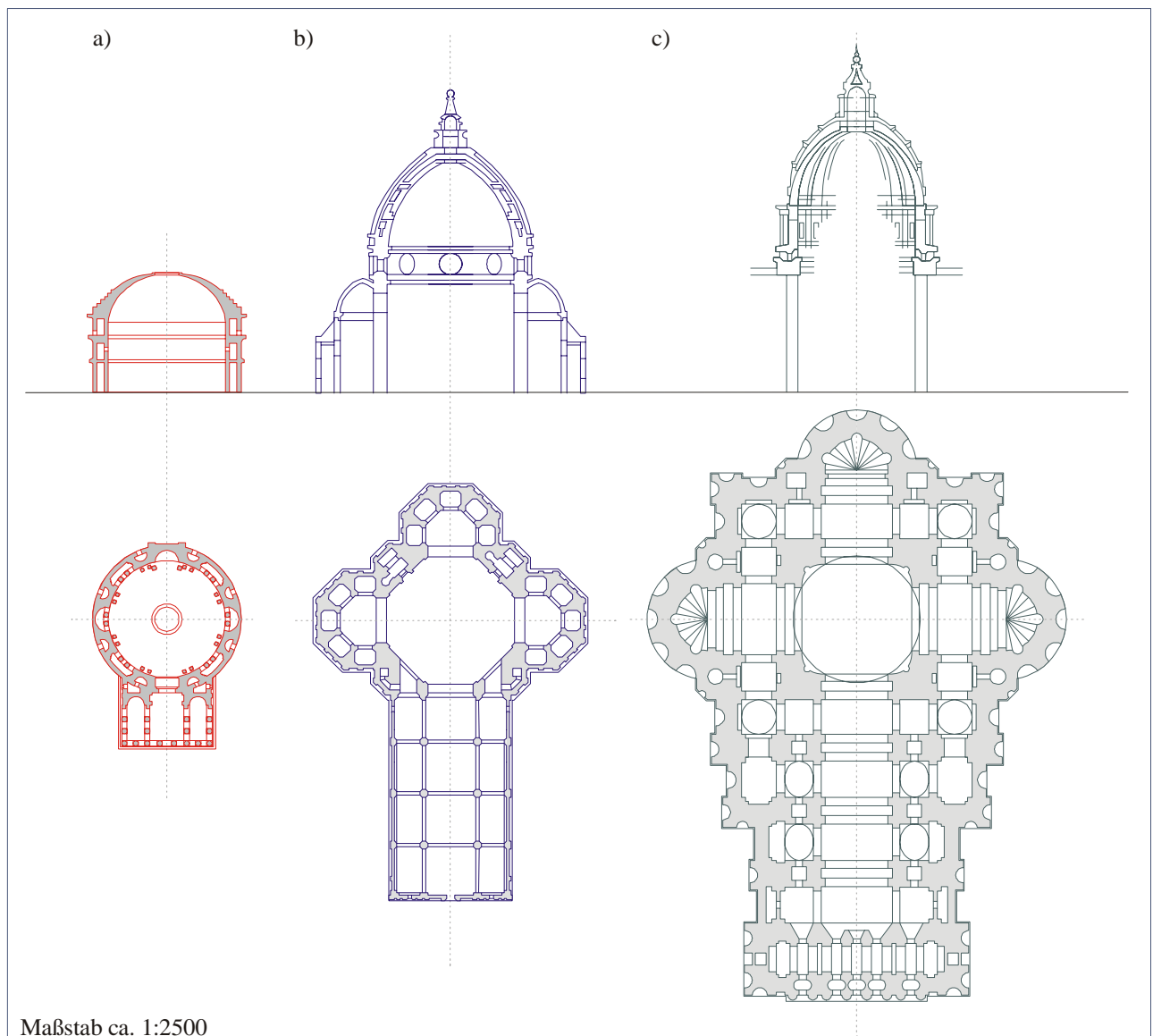


Bild 2.3.2: Bedeutende Kuppelbauten in Vertikalschnitt und Grundriß.

- a) Pantheon in Rom.¹³
- b) Santa Maria del Fiore in Florenz.¹⁴
- c) St. Peter in Rom.¹⁵

¹² Vgl. Bild 2.3.2.

¹³ Pantheon, Rom, 27 v. Chr. errichtet durch MARCUS VIPSANIUS AGRIPPA (64/63 - 12 v. Chr.). Nach Brand 118 bis 125 n. Chr. unter HADRIAN (PUBLIUS AELIUS SERGIA HADRIANUS, 78 - 138) neu errichtet durch APOLLODORUS VON DAMASKUS, letzter Wiederaufbau nach Brand 191 n. Chr.

¹⁴ Santa Maria del Fiore, Florenz, 1296 Beschluß zum Bau der Kirche als Ersatz für Santa Reparata, der Bau des Doms begann 1357, Der Tambour wurde im Jahr 1418 fertiggestellt, der Bau der Vierungskuppel erfolgte 1417 – 1446 nach Plänen von FILIPPO BRUNELLESCHI (1377 - 1446).

¹⁵ St. Peter, Rom, begonnen 1506 nach Plänen von DONATO D'ANGELO BRAMANTE (1444 –1514), Fertigstellung von 1646 bis 1664 nach Plänen von MICHELANGELO BUONARROTI (1475 - 1564). Bau der Laterne 1590, Anfertigung der Fassade 1607 – 1626 durch STEFANO MADERNA (1556 -1629) im barocken Stil.

2.3.3 Die Korrelation von Architekturform und Strukturform im Kuppelbau von den Anfängen bis in das Zeitalter des Barock.

Schutzkuppeln.

Die ersten von Menschhand erschaffenen Kuppeln besaßen ausschließlich Schutzfunktion. Ihr Ursprung kann in Höhlen, die die Urform menschlicher Behausungen waren, gesehen werden.¹⁶ In Anlehnung daran waren auch die ersten vom Menschen bewußt gestalteten Kuppeln als einschalige Konstruktion ausgeführt. Diese Konstruktionsform zeigt beispielsweise die Kuppel der Prachtrotunde der Hadrianvilla in Tivoli.¹⁷ Sie ist einschalig und besitzt kein Schutzdach. Im Zenit der Kuppel befindet sich ein Auge zur Belichtung des Binnenraumes. Hergestellt wurden diese Kuppeln in Natur- und Kunststeinmauerwerk und aber auch wie das Pantheon in Rom¹⁸ in römischem Beton, wobei hier zur Verbesserung des Lastabtrages Zuschlagstoffe mit vom Zenit der Kuppel aus zunehmender Rohdichte verwendet wurden.

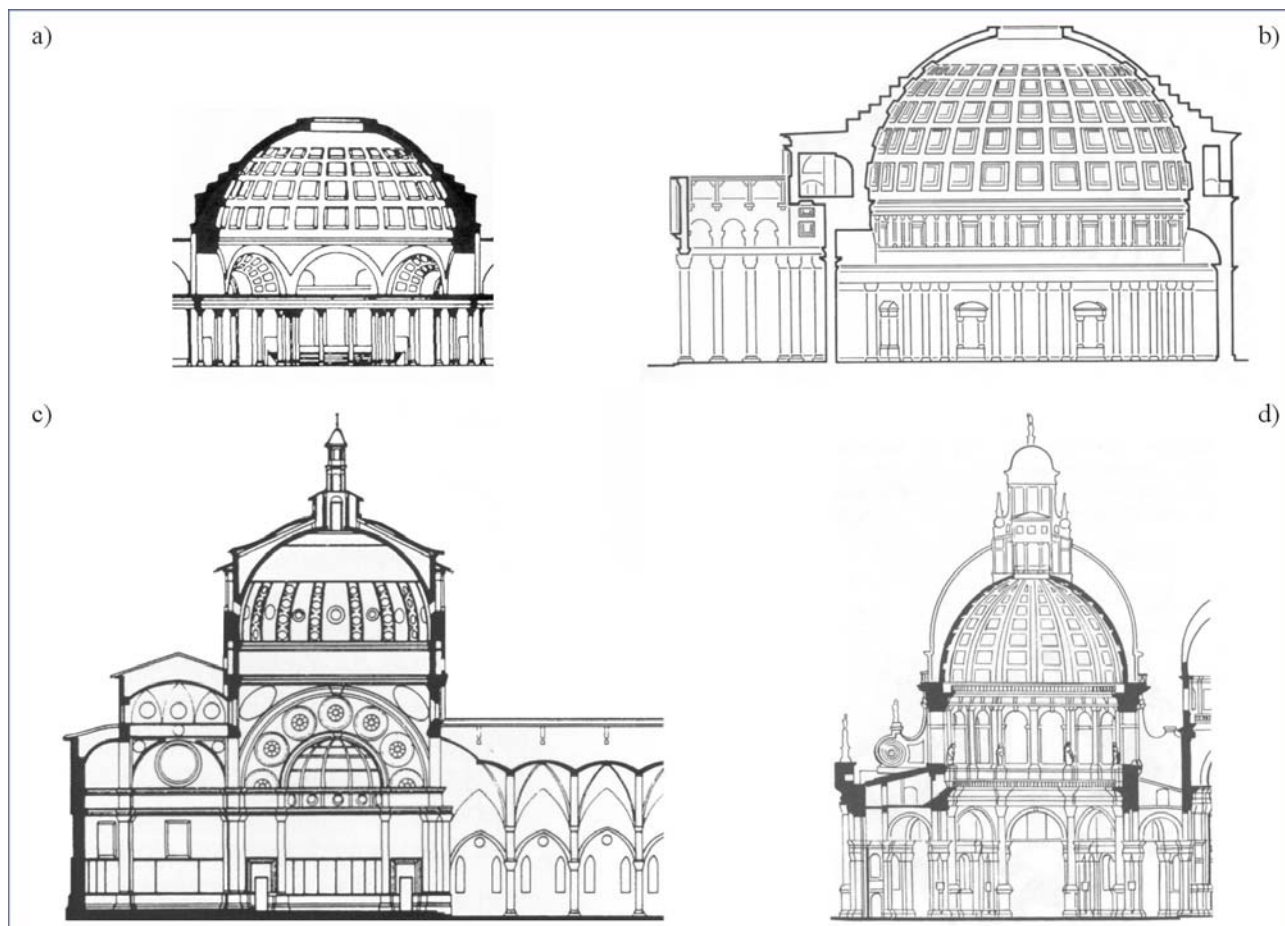


Bild 2.3.3: Die Entwicklung der Schutzkuppeln.

- Einschalige Kuppel ohne Schutzdach - Hadrianvilla in Tivoli.
- Einschalige Kuppel ohne Schutzdach - Pantheon in Rom.
- Steingedeckte Schutzkuppel (Schutzdach) als Holzkonstruktion über der eigentlichen Kuppel - Santa Maria della Grazie in Mailand.
- Schutzkuppel mit kuppelförmiger Gestalt - Santa Maria della Salute in Venedig.

¹⁶ Vgl. Heinle & Schlaich, 1996.

¹⁷ Vgl. Bild 2.3.3 a. Hadrians-Villa, Tivoli, erbaut zwischen 118 und 38 v. Chr. von unbekanntem Architekt, nur teilweise ergraben. Ländliche Residenz auf flachem Hügelland mit locker gegliederten Gebäudegruppen.

¹⁸ Vgl. Bilder 2.3.2 a und 2.3.3 b.

In der weiteren Entwicklung des Kuppelbaus wurde das Auge zum Schutz des Binnenraumes vor Atmosphärenteilchen geschlossen. Zur Erzielung einer größeren Dauerhaftigkeit der Kuppel erhielt diese eine Schutzkuppel, die als stein- oder blechgedeckte Holzkonstruktion über der eigentlichen Kuppel aufgestellt wurde. Zunächst erhielten die Schutzkuppeln unabhängig von der Architekturform der Kuppel die Gestalt eines Kegeldaches wie in Santa Maria della Grazie in Mailand.¹⁹ Mit der zunehmenden Perfektionierung der äußeren Architekturform der Kuppelbauwerke erhielten die Schutzkuppeln eine kuppelförmige Gestalt. Als Beispiel dafür gilt die Kuppel der venezianischen Kirche Santa Maria della Salute hoch über dem Canal Grande.²⁰ In der Betrachtung der Korrelation von Architekturform und Strukturform kann festgehalten werden, daß in den frühen Schutzkuppeln die beiden Formen identisch waren. Späterhin entstand eine Divergenz zwischen Strukturform und – zumeist äußerer – Architekturform. Für die in der Architekturform perfektionierten Schutzkuppeln gilt, daß ihre Architekturformen und ihre Strukturformen jeweils ähnlich, aber nicht identisch sind. Hölzerne Schutzkuppeln über einschaligen steinernen Kuppeln waren bis in das Zeitalter des Barock und darüber hinaus gebräuchlich.

Mehrschalige Kuppeln.

Eine Überdeckung des im Zenit der Kuppeln vorhandenen Auges beeinträchtigt die Belichtung des Binnenraumes unter der Kuppel. Zur Abhilfe wurden über den Kuppeln Laternen eingeführt, die eine Belichtung des Binnenraumes zulassen und trotzdem eine Überdeckung des Auges gewährleisten. Die Laternen bildeten aber für die Kuppeln ein neues Lastbild in Form einer an ihrem oberen Rand angreifenden Ringlast. Zur Kompensation der gestiegenen Beanspruchung wurden die Kuppeln in ihrer Querschnittsabmessung kräftiger ausgeführt und zur Reduktion ihrer Eigenlast in mehrschalige Kuppeln aufgelöst. So entstanden tragende Außenkuppeln, die durch Rippen mit der eigentlichen Hauptkuppel verbunden waren. Diese Baukonstruktion wird als zweischalige Hauptkuppel statisch wirksam. Für die Kuppel von St. Peter in Rom hatte MICHELANGELO in seinem Holzmodell sogar eine dreischalige Kuppel vorgesehen, die allerdings nicht zur Ausführung kam.²¹ Die Außenkuppeln der mehrschaligen Kuppelkonstruktionen übernehmen die Aufgabe der Schutzkuppeln. Sie haben daher vielfach eine geringere Querschnittsabmessung als die innere Schale der Hauptkuppel.

Ein besonders interessantes, frühes Beispiel für eine mehrschalige Kuppel ist die von Santa Maria del Fiore in Florenz mit einer zweischaligen Kuppel über achteckigem Grundriß in der Form eines Klostergewölbes.²² Die Kuppel konnte ohne Lehrgerüst erbaut werden.²³

¹⁹ Vgl. Bild 2.3.3. c. Santa Maria della Grazie, Mailand, Errichtung eines Zentralbaues von DONATO D'ANGELO BRAMANTE (1444 -1514) in den Jahren 1492 bis 1497 im Renaissance-Stil.

²⁰ Vgl. Bild 2.3.3. d. Santa Maria della Salute, Venedig, Errichtung durch BALDASSARE LONGHENA (1598 - 1682).

²¹ Vgl. Bilder 2.3.4 b und c.

²² Vgl. Bilder 2.3.2 b und 2.3.4. a.

²³ Vgl. Borri & Chiarugi, 1996, oder Heinle & Schlaich, 1996.

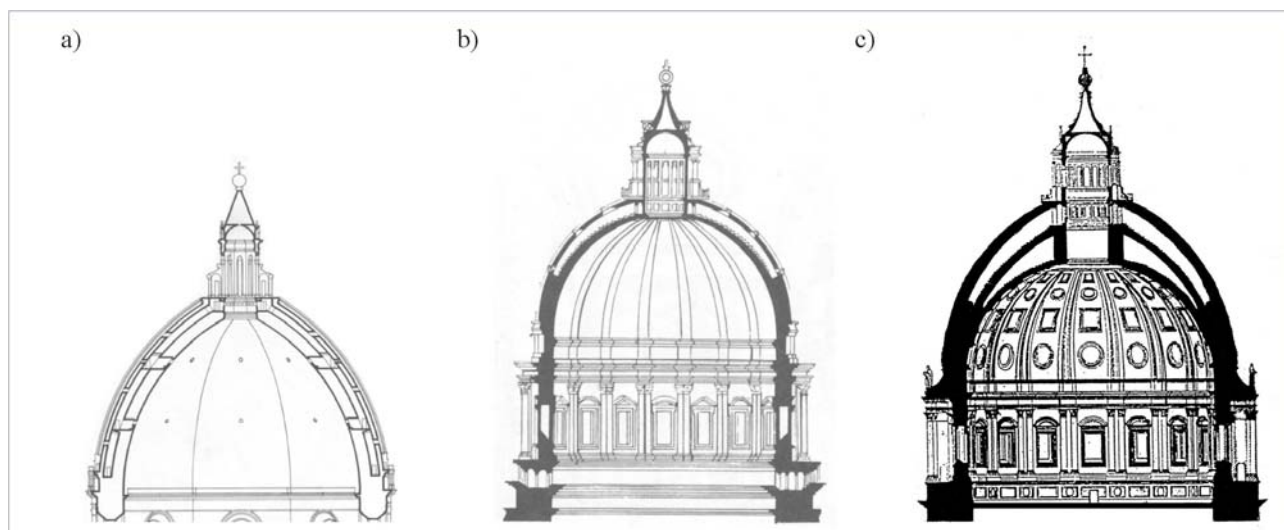


Bild 2.3.4: Gegenüberstellung mehrschaliger Kuppeln.

- a) Zweischaliges rippenverstärktes Kreuzgewölbe - Santa Maria del Fiore in Florenz.
- b) Zweischalige Kuppel - St. Peter in Rom.
- c) Dreischalige Kuppel - St. Peter in Rom (Entwurf).

Überhöhung der Kuppeln.

Neben den Überlegungen, die Tragfähigkeit der Kuppeln durch ihre mehrschalige Ausbildung zu erhöhen, traten Bestrebungen, ihre Krümmung zu ändern und damit ihr Spannungs- und Verformungsverhalten zu beeinflussen. Während DONATO BRAMANTE²⁴ für St. Peter noch eine einschalige Kuppel mit einer liegend elliptischen Erzeugenden vorsah, wählte MICHELANGELO bereits in einem Entwurf mit einer zweischaligen Kuppel einen überhöhten Meridian in stehend elliptischer Form.²⁵ Im Gegensatz zu oströmischen Sakralbauten, die beispielsweise wie die Hagia Sophia in Konstantinopel (Istanbul)²⁶ flache Kuppeln bevorzugten, wird bei überhöhten Kuppeln der ringzugkraftführende Bereich unterhalb der Bruchfuge größer.²⁷ Deshalb konnten Rißbildung in meridionaler Richtung, die aus den vom Mauerwerksverband nicht aufnehmbaren Ringzugkräften resultieren, nicht vermieden werden. In den Mauerwerksverband schlaff eingelegte Ringanker konnten die Ringkräfte aufnehmen, die Ausbildung der meridialen Risse aber nicht vermeiden. Von GIOVANNI POLENI²⁸ wurde im Zusammenhang mit einer Modelluntersuchung für das Tragwerksverhalten der Kuppel von St. Peter in Rom die Ausbildung einer Kuppel mit einem nach der Kettenlinie geformten Meridian vorgeschlagen. Derartige Kuppeln verlieren an ästhetischem Reiz, besitzen aber keine Bruchfuge und damit keinen Bereich mit umlaufenden Ringzugkräften.

In der weiteren Entwicklung entstanden Kuppeln, in denen zur ringzugkraftfreien Ableitung großer Laternenlasten Kegelschalen zwischen der inneren und äußeren Schale der Hauptkuppel eingeschrieben wurden.²⁹

²⁴ Vgl. Bild 2.3.5 b.

²⁵ Vgl. Bild 2.3.5 c.

²⁶ Vgl. Bild 2.3.5 a. Hagia Sophia, Konstantinopel, Bau von 532 bis 537 unter KAISER JUSTINIAN (527 - 565) nach Plänen von ANTHEMIOS VON TRALLES und ISIDORO VON MILET, die Weihe erfolgte im Jahre 562.

²⁷ Vgl. Mainstone, 1996.

²⁸ GIOVANNI POLENI (1683 – 1761).

²⁹ Vgl. Anhang A.10.

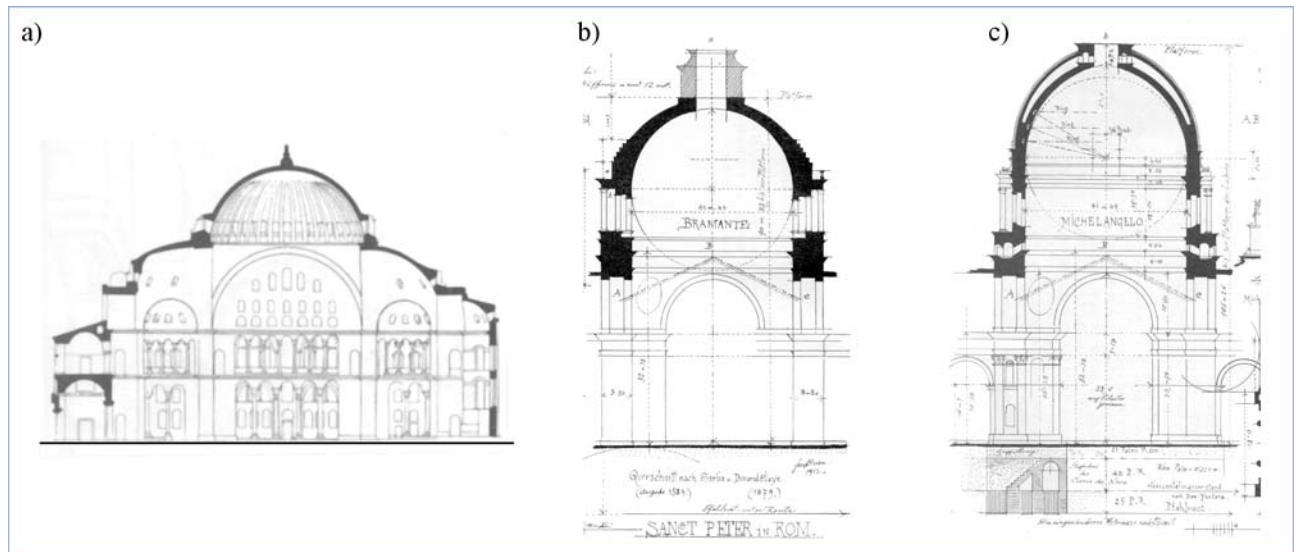


Bild 2.3.5: Überhöhung der Kuppel.

- a) Flache Kuppel - Hagia Sophia in Konstantinopel.
- b) Liegend-elliptische Kuppel - St. Peter in Rom (Entwurf).
- c) Überhöhte (stehend-elliptische) Kuppel - St. Peter in Rom (Entwurf).

Innenkuppeln.

Für die Kuppeln des Barock gilt grundsätzlich, daß sie über einem kleineren Grundriß als ihre Vorbilder aus der Epoche der Renaissance errichtet wurden. Ungeachtet dessen erreichten die Kuppelbauten des Barock eine erhebliche Gebäudehöhe, so daß ihre Vierungsräume schlanker erschienen. Zur Erzielung eines gefälligeren Bildes der inneren Architekturform wurden in diesen barocken Kuppelbauwerken vielfach Innenkuppeln über den Gurtbögen eingefügt. In der Folge entstand in der Raumabfolge des Gebäudes zwischen der Innenkuppel und der Hauptkuppel ein neuer zusätzlicher Raum, der vielfach die Bezeichnung oberer Kuppelraum trägt.³⁰

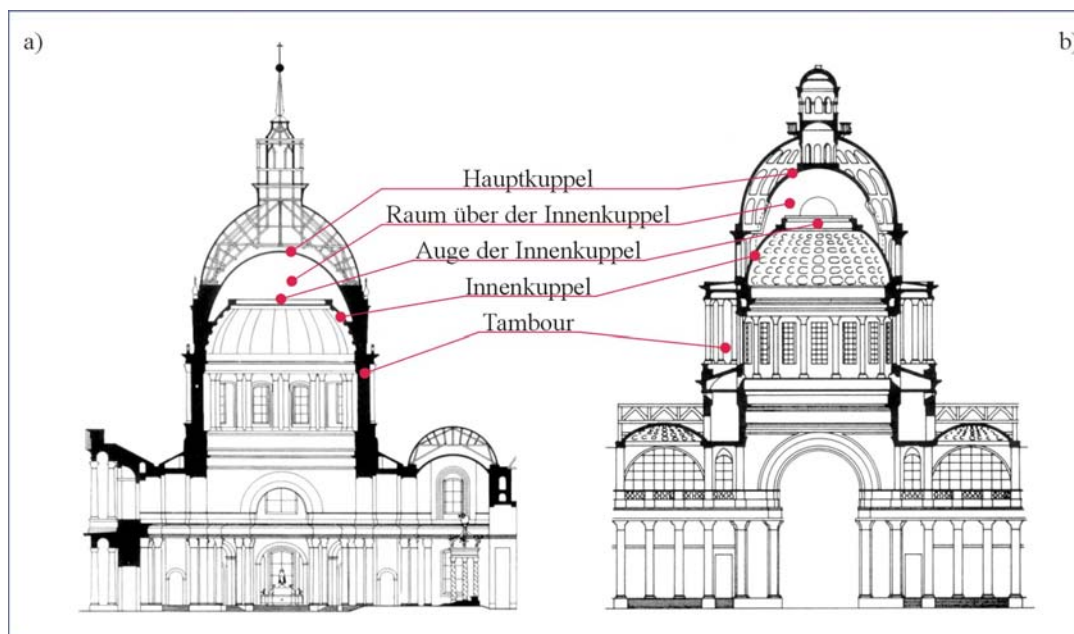


Bild 2.3.6: Einfügung von Innenkuppeln.

- a) Pantheon (Ste. Geneviève) in Paris.
- b) Invalidendom in Paris.

Weiterentwicklung der äußeren Architekturform barocker Kuppelbauten.

Im Allgemeinen erhebt sich über dem Kirchenschiff ein kreisrunder, von Fenstern durchbrochener Kuppeltambour mit der darüber befindlichen Hauptkuppel und der Laterne. Eine interessante Weiterentwicklung der äußeren Architekturform zeigt sich am Tambour von Santa Maria della Salute in Venedig. Hier finden sich auf die Eckpunkte des oktogonalen Tambours zulaufende kräftige Voluten, die dem Bau in seiner Silhouette eine wunderbare Harmonie verleihen. Die Voluten sind an Santa Maria della Salute prinzipiell nicht neu, sie zeigen sich aber an dem Bau in einer besonderen baukünstlerischen Vollendung.³¹

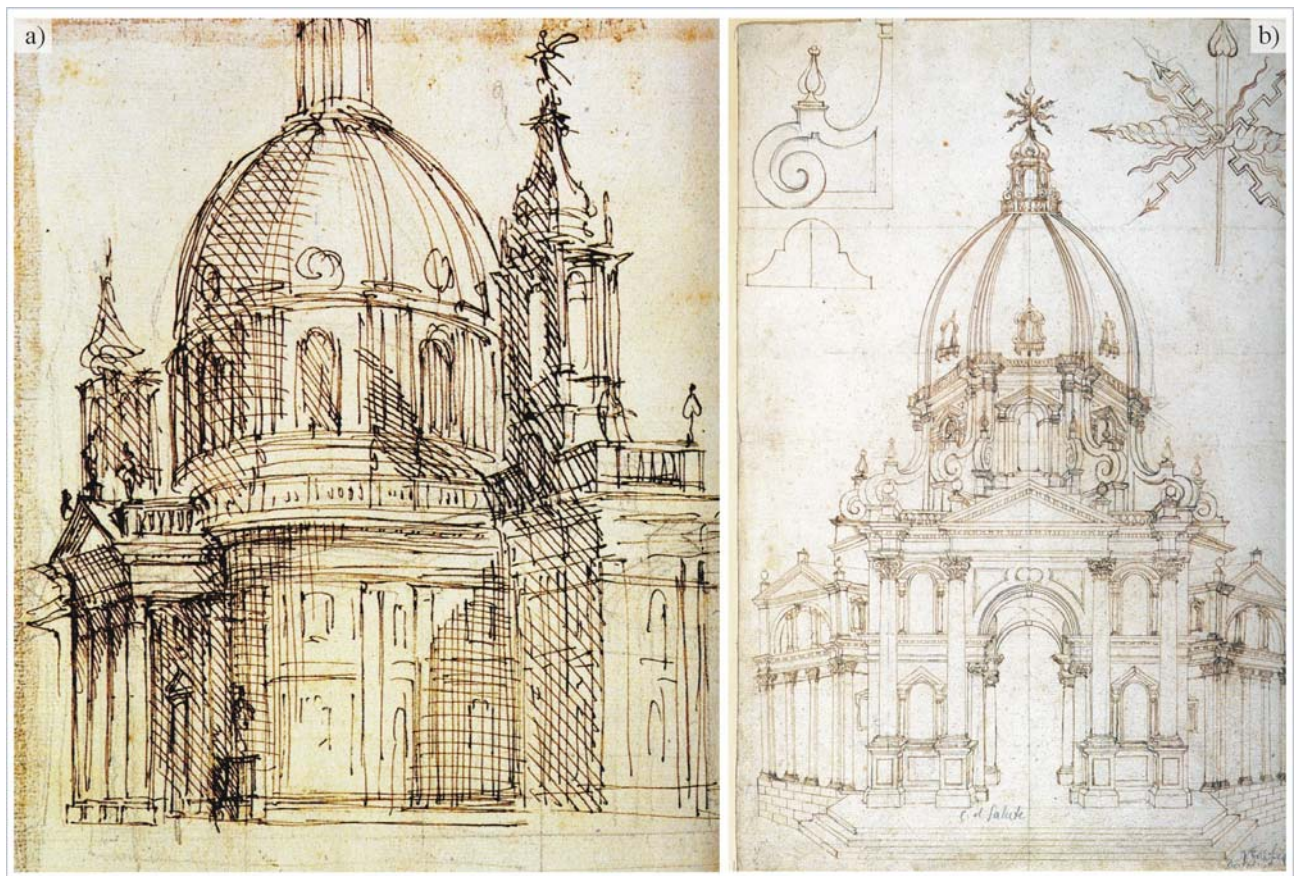


Bild 2.3.7: Weiterentwicklung der äußeren Architekturform durch Anfügung von Voluten.

a) Perspektivische Studie der Basilika zu Superga. Zeichnung von FILIPPO JUVARRA.³²

b) Fassade von Santa Maria della Salute. Zeichnung eines unbekannten Künstlers.³³

2.3.4 Grundsätzliche statisch-baukonstruktive Eigenschaften von Kuppeln.

Zu den grundsätzlichen statisch-baukonstruktiven Eigenschaften von Kuppeln und zu deren Tragverhalten existieren in der Literatur reichhaltige Angaben.³⁴ Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Baumeister vergangener Zeiten das Tragverhalten der Kuppeln anhand von Erfahrungen eingeschätzt haben. Erst mit der Entwicklung und Einführung der modernen Baumechanik kann dieses Tragverhalten qualifiziert ermittelt werden.

³¹ Vgl. Bild 2.3.7.

³² Filippo Juvarra (1678 -1738), Turin, Museo Civico de' Arte Antica, Abbildung nach Milon, 1999.

³³ Wien, Graphische Sammlung Albertina, Inventarnummer 298, Abbildung nach Milon, 1999.

³⁴ Vgl. beispielsweise Siegel, 1960, Büttner & Hampe, 1977 oder Heinle & Schlaich, 1996.

Traditionelle Kuppeln sind zumeist rotationssymmetrische Gebilde.³⁵ Zur Erzeugung ihrer Mittelflächen wird eine Kurve, die Erzeugende, um eine Achse rotiert. Entsprechend kann eine Definition dieser Kuppeln aus baumechanischer Sicht vorgenommen werden. Kuppeln sind rotationssymmetrische Schalen mit einer doppelten GAUßschen Krümmung, die an ihrem unteren Rand eine kontinuierliche Unterstützung erfahren.

Eine Vielzahl von Kuppeln besitzt einen Kreis als Erzeugende. In der so gebildeten Kugelschale entstehen unter Eigenlast³⁶ in Meridianrichtung Druckspannungen. In der Schalenebene senkrecht dazu bilden sich in den Breitenkreisen Ringspannungen aus. Im Bereich des Zenits der Kuppel sind diese Ringspannungen Ringdruckspannungen, die vom Betrag nach über den Meridianverlauf gesehen Richtung Kuppelaufleger kleiner werden. In einem für jeden Lastfall einer Kugelschale definierbaren Breitenkreis sind die Ringspannungen null. Dieser Breitenkreis wird als Bruchfuge bezeichnet.³⁷ Unterhalb der Bruchfuge gehen die Ringspannung in Ringzugspannungen über, die von gemauerten Kuppelschalen im Allgemeinen nicht aufgenommen werden können. Aus diesem Grund stellen sich in gemauerten Kuppeln unterhalb der Bruchfuge Meridianrisse ein. Diese Risse entstehen zumeist an querschnittsgeschwächten Stellen der Kuppel, die über den Kuppelöffnungen liegen. Im Mauerwerksverband eingelegte Ringanker können dazu beitragen, die Ringzugkräfte aufzunehmen. Am unteren Auflager einer Kuppel entstehen neben vertikalen auch horizontale Auflagerkräfte, deren Größe sich gleichfalls in Abhängigkeit der Wirksamkeit der Ringanker einstellt.

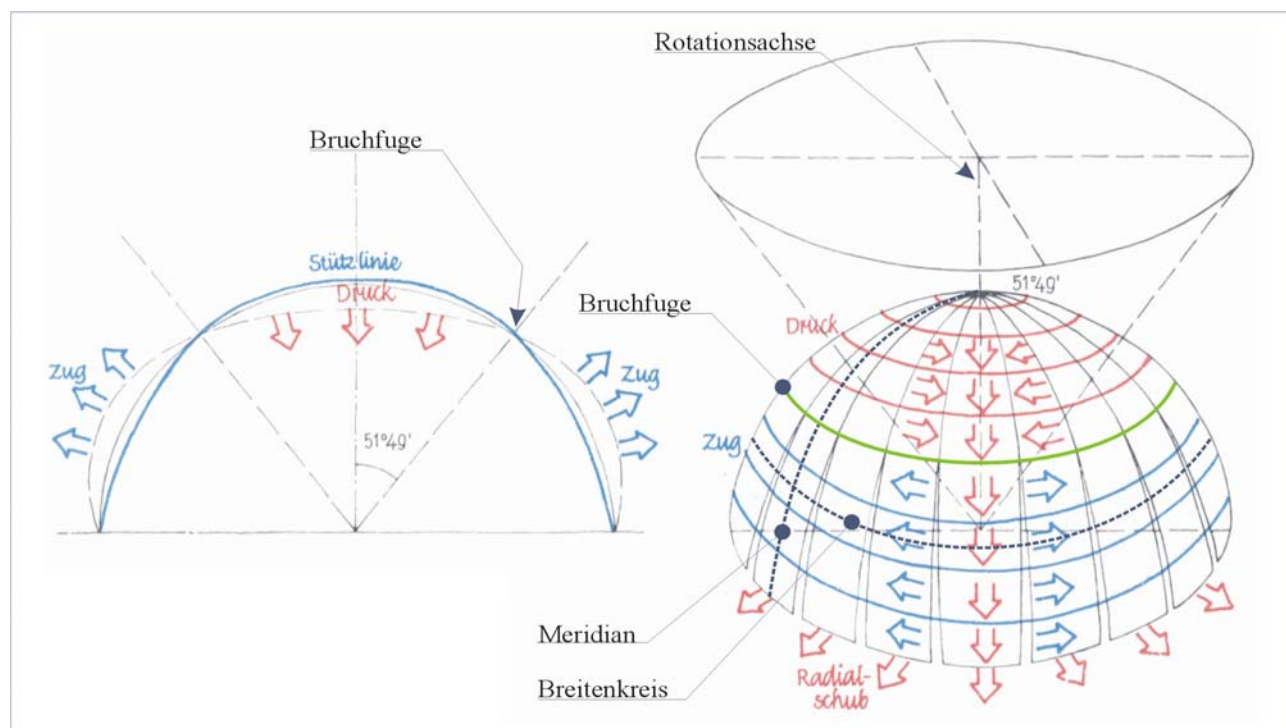


Bild 2.3.8: Das prinzipielle Tragverhalten von Kuppeln.³⁸

³⁵ Ein Beispiel für eine nicht über einem kreisrunden Grundriß errichteten Kuppel ist die der Karlskirche in Wien. Errichtet 1716 bis 1737 von FISCHER VON ERLACH, (1656-1723).

³⁶ Für das globale Tragverhalten ist in Kuppeln die Eigenlast infolge der vorherrschenden Mächtigkeit der Kuppelschale der bestimmende Lastfall. Vgl. Bilder 2.3.8. und 2.3.9.

³⁷ Für Halbkugelschalen mit konstanter Schalendicke (d) unter Eigenlast befindet sich die Bruchfuge bei einem Winkel von 52° , gemessen von der Rotationsachse. Vgl. Bild 2.3.8

³⁸ Darstellung auf der Grundlage einer Abbildung von Büttner & Hampe, 1977.

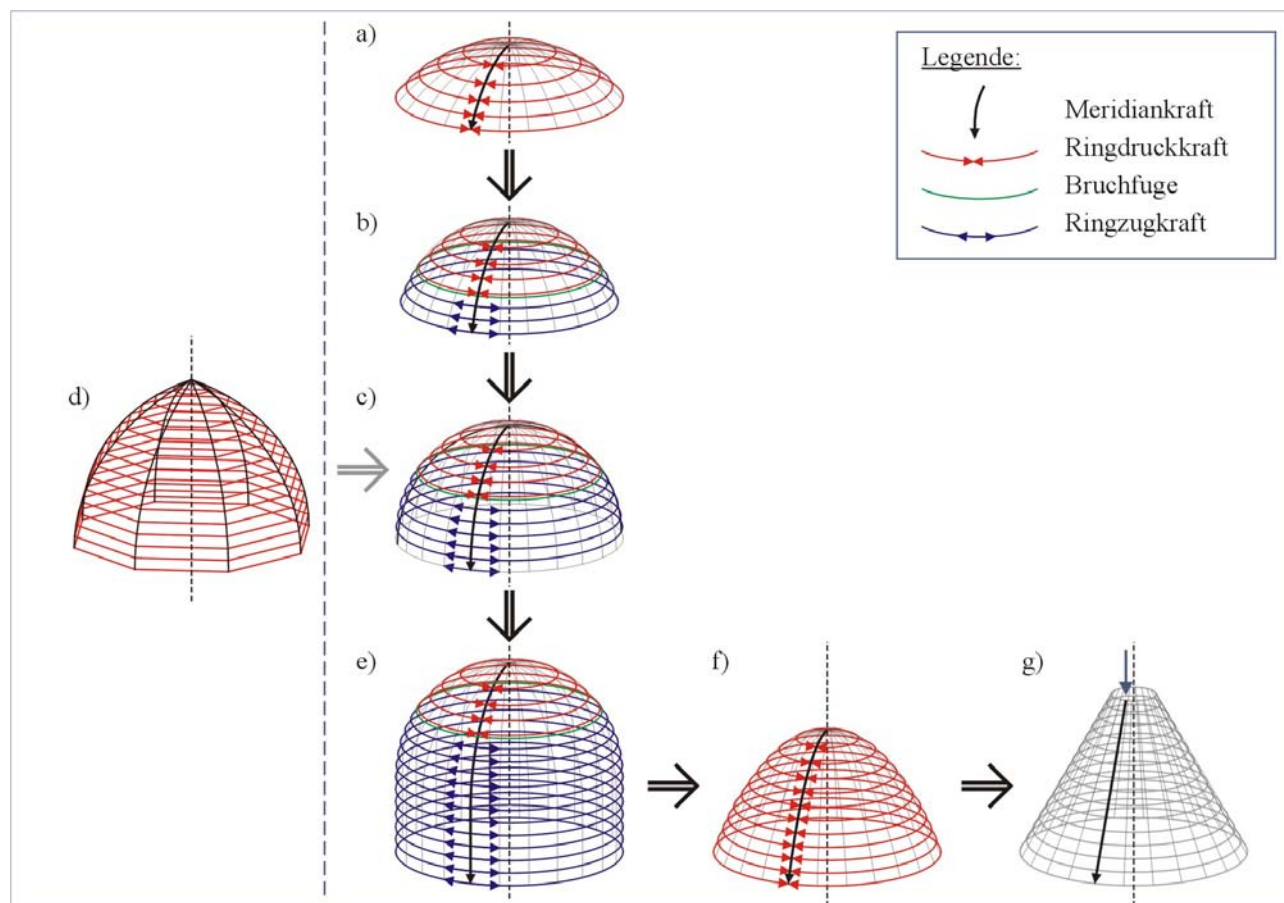


Bild 2.3.9 Ausgewählte Kuppelformen mit der Angabe der vorherrschenden Schnittgrößen im Membranzustand. Kennzeichnung der Abfolge ihrer Anordnung im Kuppelbau.

- a) Flache Kugelschale. – Es wirken nur Druckkräfte.
- b) Steilere Kugelschale. – Auftreten einer Bruchfuge.
- c) Halbkugelschale. – Eine Bruchfuge.
- d) Kreuzgewölbe. – Sonderform.
- e) Halbkugelschale auf Zylinderschale (Tambour). – Eine Bruchfuge, die Ringzugkräfte klingen am Tambourfuß ab.
- f) Parabolische Kuppelschale (Paraboloid). – Keine Bruchfuge.
- g) Kegelschale. – Ideal geeignet zum Abtrag einer Laternenlast.

2.3.5 Die Korrelation von Kuppeln und ihrem Unterbau aus der Sicht der Strukturform.

Die bereits erwähnten Eigen- und Auflasten sind in traditionellen Hochbauwerken die maßgebenden Lasten für die raumüberdeckenden Elemente. Sie erzeugen bei der Anwendung von Balkenkombinationen und Platten an deren unfreien Rändern ausschließlich lotrechte (perpendikulare) Auflagerreaktionen, während bei Gewölben zusätzlich dazu horizontale Auflagerkomponenten von meist beachtlicher Größe auftreten.³⁹ Diese können unter Umständen⁴⁰ dem Betrag nach größer sein als ihre zugehörigen Vertikalkomponenten. Daher benötigen Gewölbe einen geeigneten Unterbau, der in der Lage ist, diese horizontalen Auflagerkomponenten sicher zum Fundament abzuleiten. Alternativ dazu können gegenüberliegende horizontale Auflagerkomponenten mittels Zugbändern gegenseitig aufgehoben werden⁴¹. Große, fialengleiche Auflasten⁴²

³⁹ Vgl. Bild 2.3.10.

⁴⁰ Dies gilt beispielsweise bei Gewölben mit sehr geringem Stich.

⁴¹ Vgl. Bilder 2.3.10 und 2.3.12.

⁴² Vgl. Bild 2.3.11.

über den Stützmauern der Gewölbe können dieses Problem mildern, da sie die resultierende Stützkraft näher an den Schwerpunkt des Stützquerschnittes heranführen.

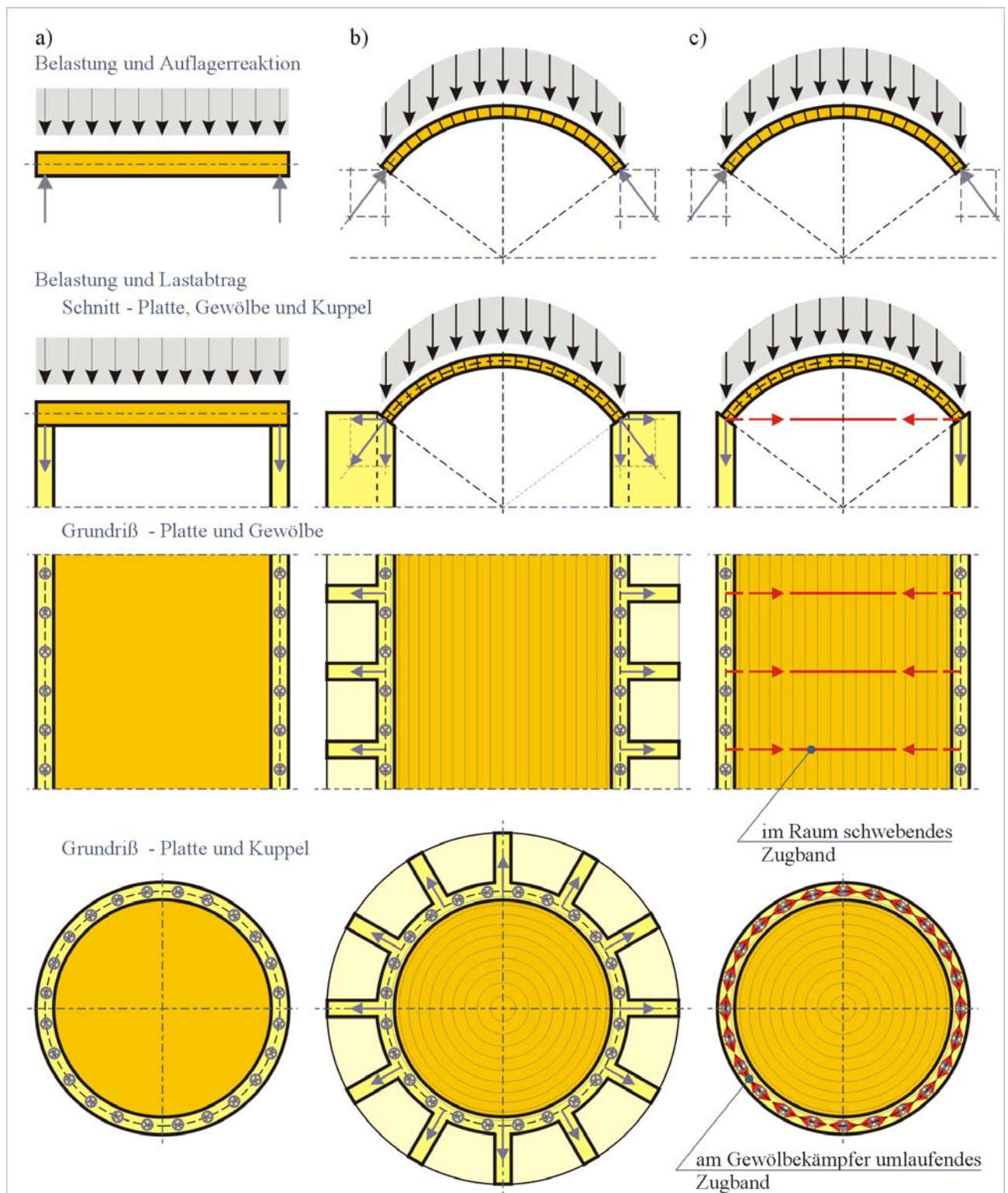


Bild 2.3.10: Auflagerreaktionen von Platte, Gewölbe und Kuppel über rechteckigen (an den Längsseiten liniengelagerten) und kreisrunden (ringförmig liniengelagerten) Grundriß.

- Platte.
- Gewölbe und Kuppel. Abstimmung der Horizontallasten in Widerlager.
- Gewölbe und Kuppel. Aufnahme der Horizontalkräfte in Zugbändern.

Als vorteilhaft erweist sich außerdem eine geometrische Reihung oder Kopplung von mehreren Gewölben, da so die sich gegenüberstehenden Horizontalschübe bereits an den Gewölbekämpferpunkten aufhebend kombiniert werden können.

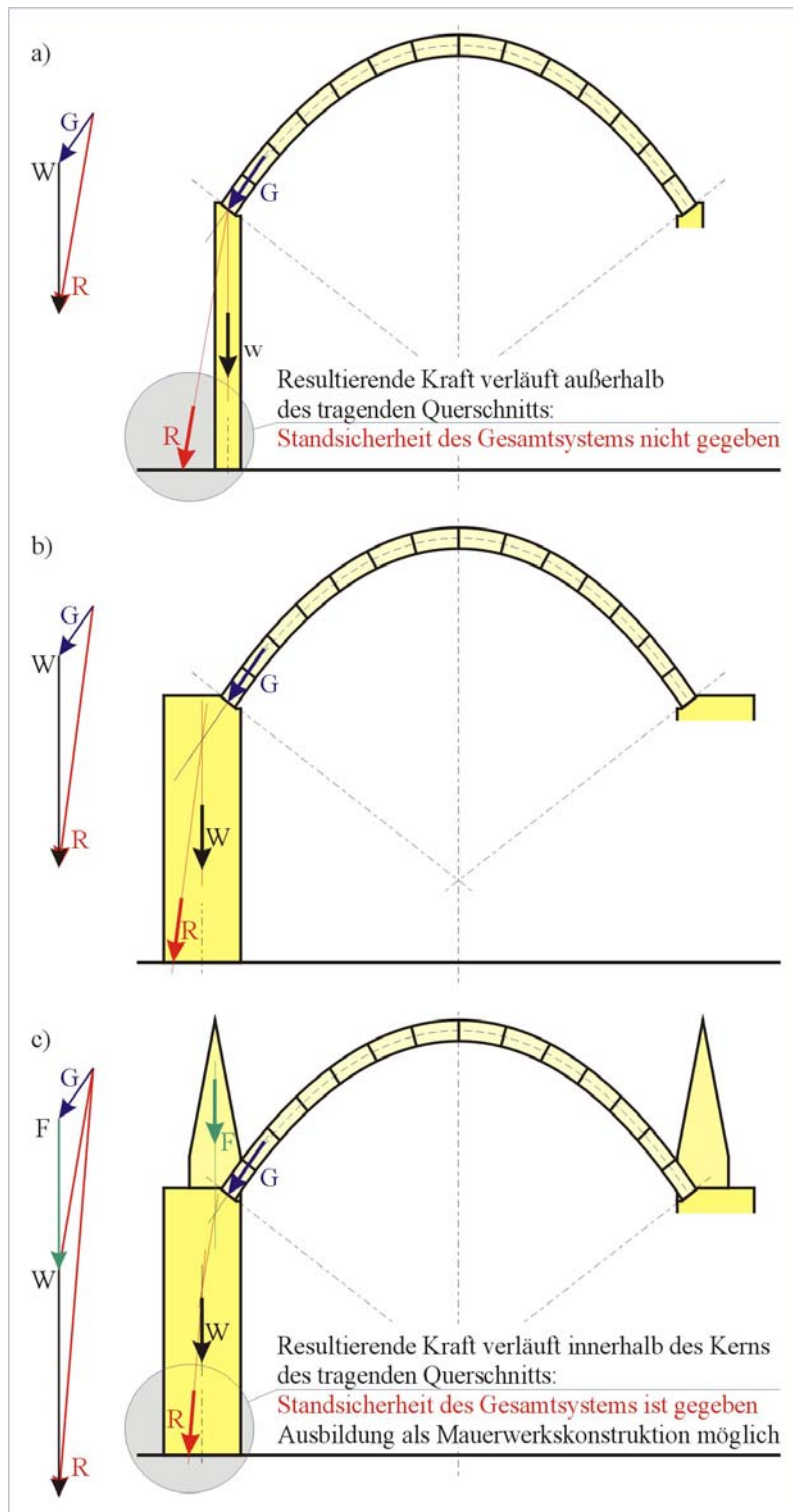


Bild 2.3.11: Ableitung des horizontalen Kuppelschubes / Gewölbeschubes.

- Die Aufnahme des Schubes ist durch ein nicht genügend widerstandsfähiges Widerlager nicht möglich.
- Abtrag des Schubes durch ein Widerlager.
- Verbesserung des Abtrages des Schubes durch ein Widerlager infolge Belastung durch eine Fiale.

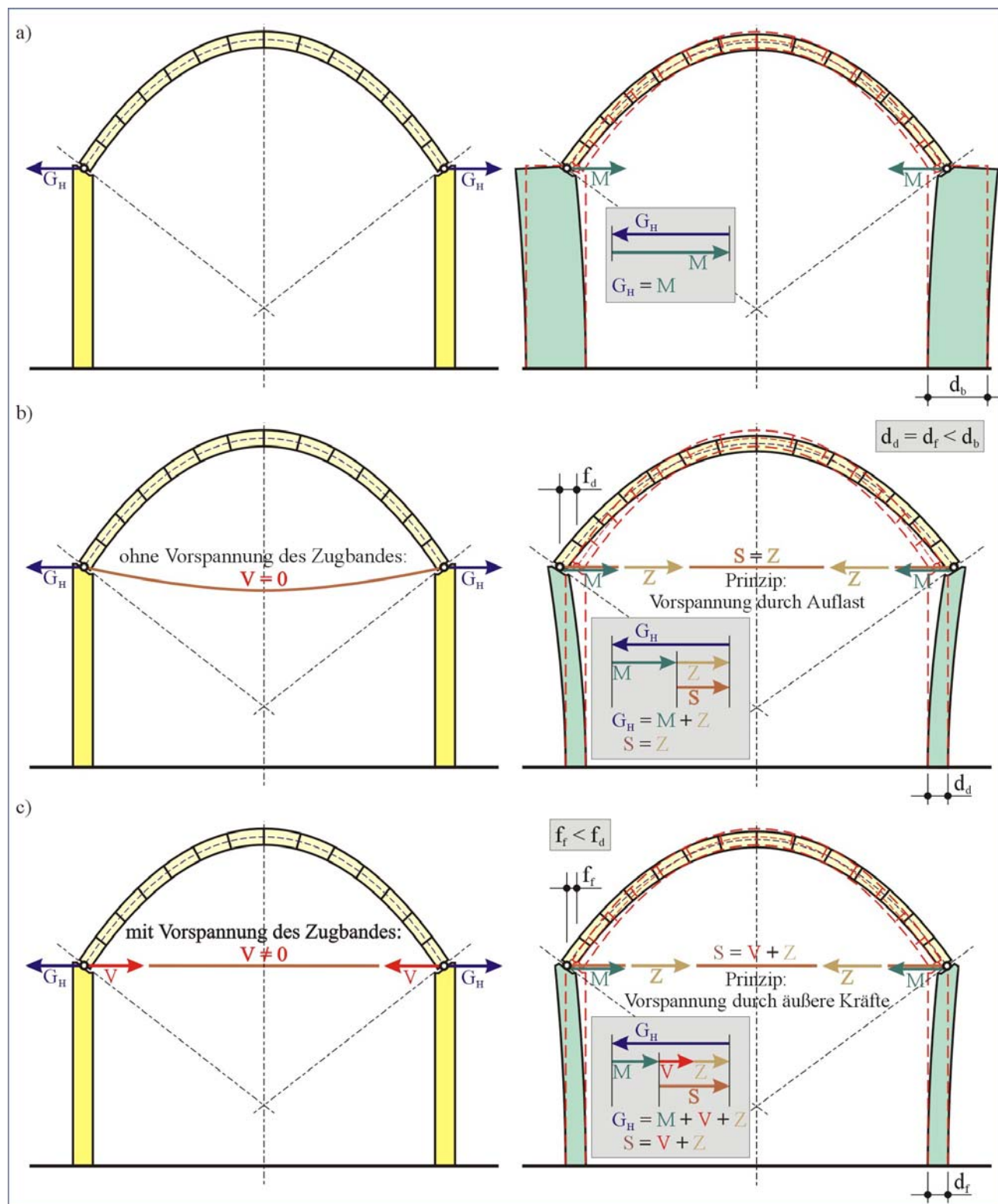


Bild 2.3.12: Abtrag des Kuppelschubes / Gewölbeschubes unter Berücksichtigung der Verformung der Konstruktion

- a) Abtrag des Schubes durch Widerlager.
- b) Abtrag des Schubes durch ein Zugband ohne Vorspannung.
- c) Abtrag des Schubes durch ein vorgespanntes Zugband.

2.3.6 Die Korrelation von Kuppeln und ihrem Unterbau aus der Sicht der Architekturform.

Im Normalfall werden Kuppeln nur selten direkt über dem Fundament errichtet. Sie sind ohnehin, auch wenn in ihrem Innern vielfach imposante Räume entstehen, zuerst weniger ein

raumbildendes als ein raumabschließendes Element der architektonischen Gestalt eines Bauwerkes. Daher fügt sich in der Regel zwischen Fundament und Kuppel der eigentliche Baukörper ein, der den Unterbau für die Kuppel darstellt und von dieser überdeckt und damit nach oben hin abgeschlossen wird. Zwangsläufig müssen dabei Kuppel und Unterbau sowohl im Grundriß als auch im Aufriß miteinander korrespondieren. Die Idealform dieser Korrespondenz im Grundriß besteht in der Kongruenz. Diese Kongruenz⁴³ ermöglicht eine kompromißlos kontinuierliche Lagerung der Kuppel an ihrem unteren Rand, die wiederum die Idealform jeglicher Lagerungsmöglichkeiten für eine Kuppel darstellt. Das für eine Kongruenz der Kreisform in Grund- und Aufriß wohl beste Beispiel ist das Pantheon zu Rom.

Völlig anders gestalten sich die geometrischen Abhängigkeiten und die statischen Übergangsbedingungen bei der Überwölbung eines polygonal begrenzten Raumes mit einer kreisrunden Kuppel.⁴⁴ Dieses Phänomen tritt nördlich der Alpen baugeschichtlich im Besonderen zuerst dann auf, wenn die Vierung einer gotischen Kathedrale nicht von einem Vierungsgewölbe, sondern von einer Vierungskuppel überspannt werden soll. Die infolge quasi-geometrischer Stetigkeit der Kuppel quasi-kontinuierlichen Lasten müssen in eine geometrisch unstetige Lagerung, nämlich in geradlinig polygonale Gurtbögen der Vierung und von dort in die punktförmigen Vierungspfeiler, überführt werden. Zur Bewältigung dieser Bauaufgaben standen den Baumeistern Konstruktionslösungen zur Verfügung, die dem Prinzip des Ein- und Umbeschreibens von Dreiecken und ausgewählten Vielecken mittels Kreisen folgen.

Gezeigt werden soll hier die geometrische Entwicklung von Außenkreiskuppeln und Innenkreiskuppeln über Vierungen, wobei die Stärke der Bauteile als Linie approximiert wird. Ausgangspunkt sind als klassische Grundfiguren das Quadrat und der Kreis.

Außenkreiskuppel.

Dem Quadrat der Vierungspfeiler wird der Grundrißkreis der Kuppel umschrieben, somit ist die Diagonale des Quadrates identisch mit dem Durchmesser der Kuppel. Die Kuppel berührt den Unterbau direkt über den Vierungspfeilern. Genau senkrecht über den Seitenlinien des Quadrates stehende Ebenen beschneiden die Halbkugel der Kuppel. Die jeweilige Schnittfigur ist ein Halbkreis, dessen Durchmesser der Seitenlänge des Quadrates entspricht, und baukonstruktiv als verstärktes Randglied ausgeführt werden muß.⁴⁵

Innenkreiskuppel.

Wenn dem Quadrat, welches die Vierungspfeiler aufspannen, der Basiskreis einer Kuppel einbeschrieben wird, der Durchmesser des Kreises also gleich der Seitenlänge des Quadrates ist, so entstehen in den Ecken des Quadrates zwangsläufig Fehlstellen, an denen die Vierung nicht überdeckt wird. Diese Fehlstellen müssen mit einer gesonderten Konstruktion geschlossen werden. Dazu muß die eigentliche Kuppel über dem Unterbau erhöht angeordnet werden. Bei kleineren Kuppeln wird zwischen diese und den Unterbau ein Zylinder geschoben und die Fehlstellen mit dreieckförmigen Trompen geschlossen. Daher tragen derartige Kuppeln auch den Namen

⁴³ Vgl. Bild 2.3.13.

⁴⁴ Vgl. Bild 2.3.14.

⁴⁵ Vgl. Bild 2.3.15 a.

Trompenkuppel. Anspruchsvoller hingegen ist die Füllung der Fehlstellen mit sphärischen Dreiecken, die in das Basisquadrat der Vierung hineinkragend gefertigt werden. Diese sphärischen Dreiecke heißen Pendentif, die damit ausgestatteten Kuppeln Pendentifkuppel. Aus rein geometrischer Sicht sind die sphärischen Dreiecke Element der Außenkreiskuppel über genau demselben Vierungsquadrat. Es ist leicht ersichtlich, daß mit der Überführung des Quadrates als Fundamentfigur der Innenkreiskuppel in ein regelmäßiges Polygon mit $n > 4$ Eckpunkten⁴⁶ das Maß des Stiches f des Pendentifs reduziert wird.⁴⁷

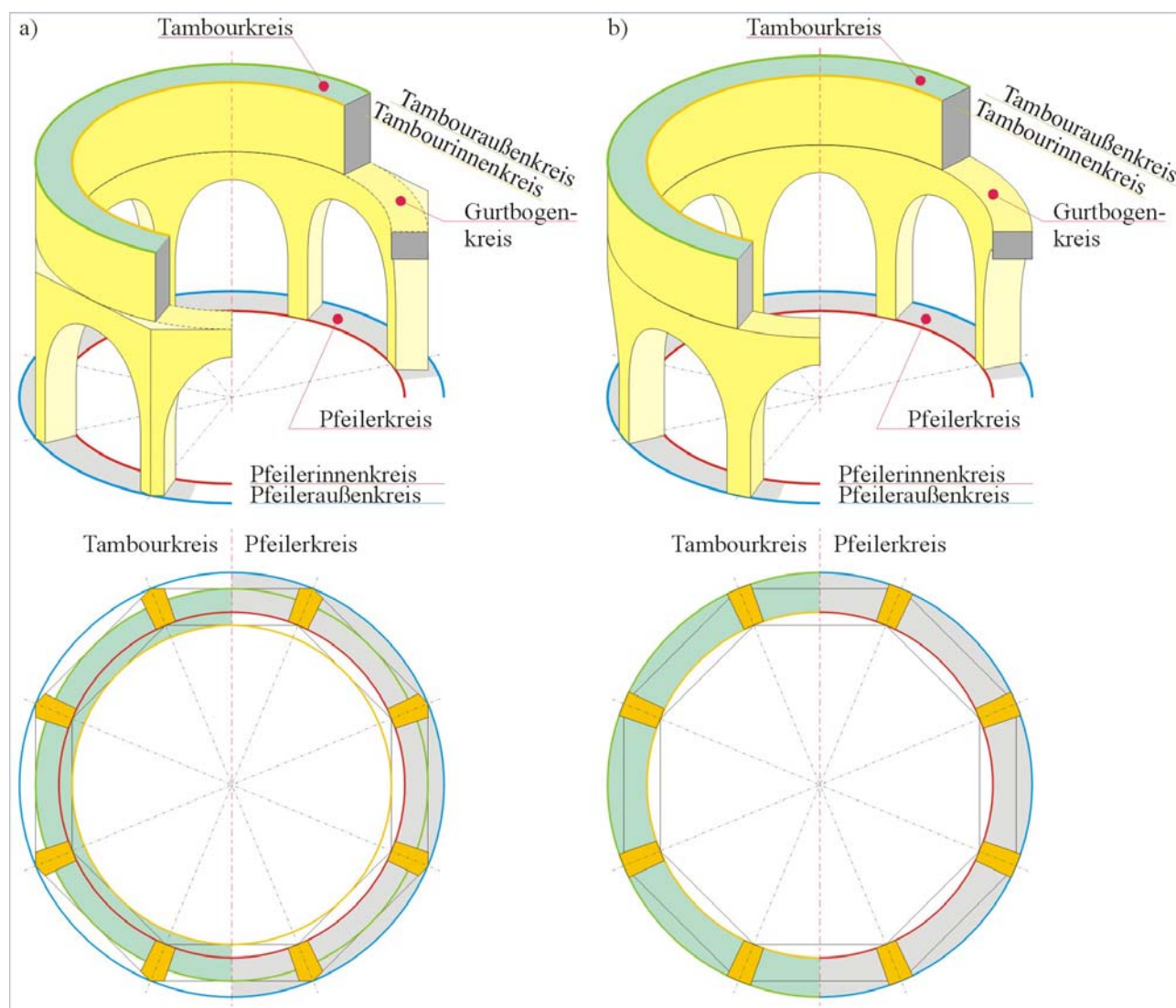


Bild 2.3.13: Definition von Tambourkreis, Gurtbogenkreis und Pfeilerkreis.

- a) Innenkreiskuppel. Isometrische Darstellung und Grundriß.
- b) Außenkreiskuppel. Isometrische Darstellung und Grundriß.

Für beide Kuppelformen gelten die beschriebenen geometrischen Beziehungen gleichfalls, wenn die Kuppel in ihrer Höhenentwicklung verändert (gedrückt oder überhöht) wird und wenn die vereinfachende Modellabbildung der Bauteile als linienförmige Elemente rückgängig gemacht wird. Unverzichtbar hingegen ist eine maßstäbliche Angabe der Bauteilstärken für Kuppel-

⁴⁶ Vor allem das Oktagon mit $n = 8$ Eckpunkten hat in der Baupraxis breite Anwendung gefunden.

⁴⁷ Vgl. Bild 2.3.15 b.

konstruktionen, die eine Mischform aus Außenkreis- und Innenkreiskuppel bilden. Dabei folgt die innere Oberfläche von Kuppel und Unterbau dem Konstruktionsprinzip der Außenkreiskuppeln und die äußere Oberfläche dem der Innenkreiskuppel. Die geometrische Konsequenz dieser Konstruktion besteht nicht nur in dem Wegfall des auskragenden Pendentifs, sondern auch in der andernfalls auftretenden Disharmonie der Bauteilstärken des mächtigen Unterbaus gegenüber der schlanken Kuppel. Besonders geeignet ist daher die Anwendung dieser Konstruktion bei der Aufführung einer leichten raumabschließenden Kuppel, die dann noch einmal von einer Stabwerkkuppel als Wetterschutzschicht überdacht wird.⁴⁸ Beispielhaft sei dafür die Kuppel von Santa Maria della Salute zu Venedig genannt.

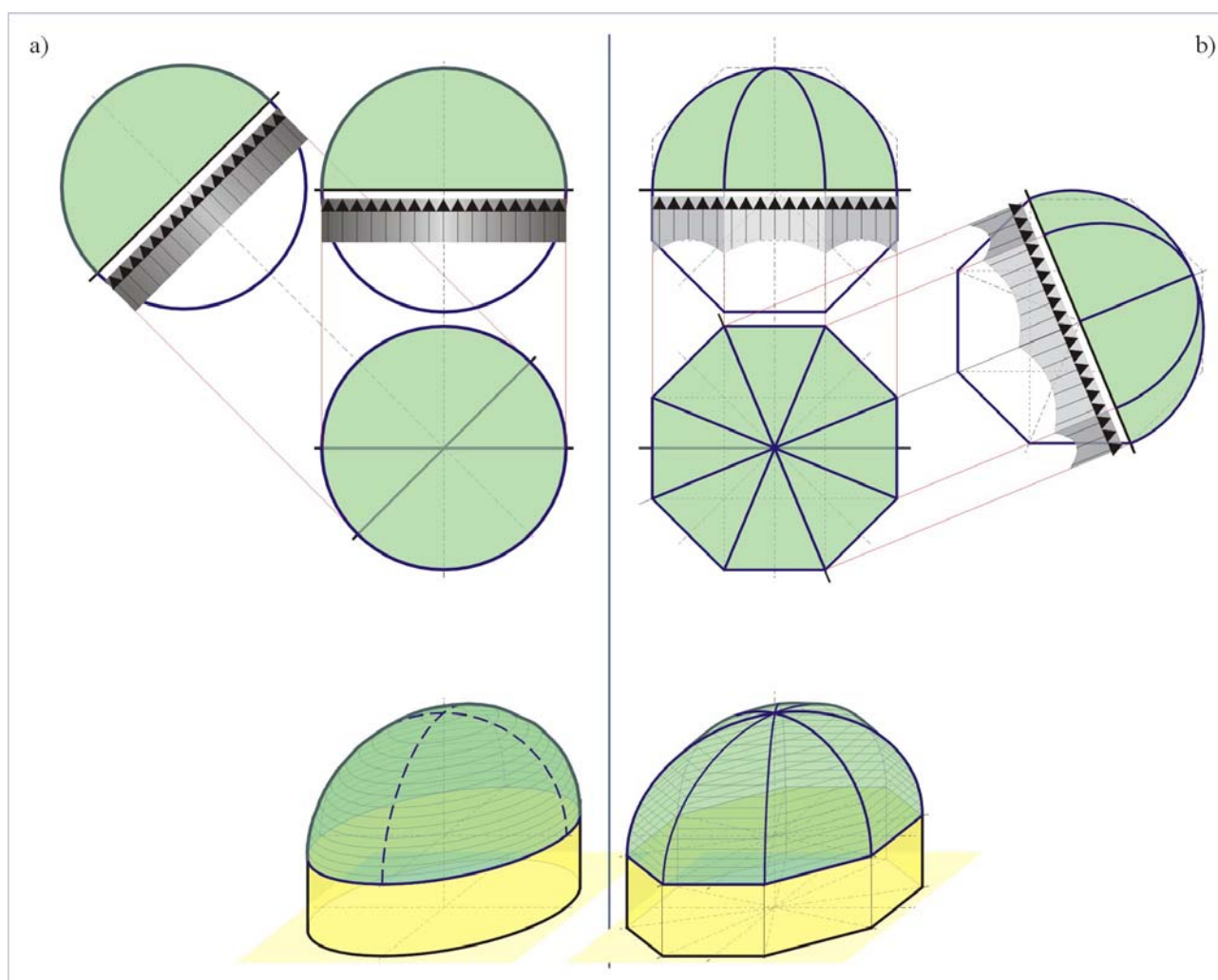


Bild 2.3.14: Geometrische Entwicklung von Grund- und Aufriß, Auflagerreaktionen und perspektivische Prinzipdarstellung.

- a) Kuppel (Halbkugelschale) über einem zylindrischen Unterbau (Tambour).
- b) Aus acht Segmenten bestehendes Klostergewölbe (Kuppel) über einem oktagonalen Unterbau (Tambour).

⁴⁸ Vgl. Bild 2.3.16.

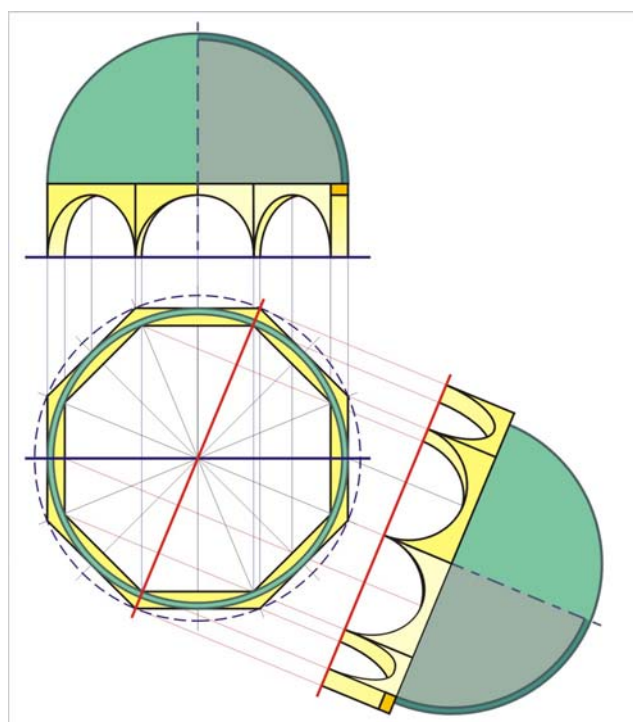
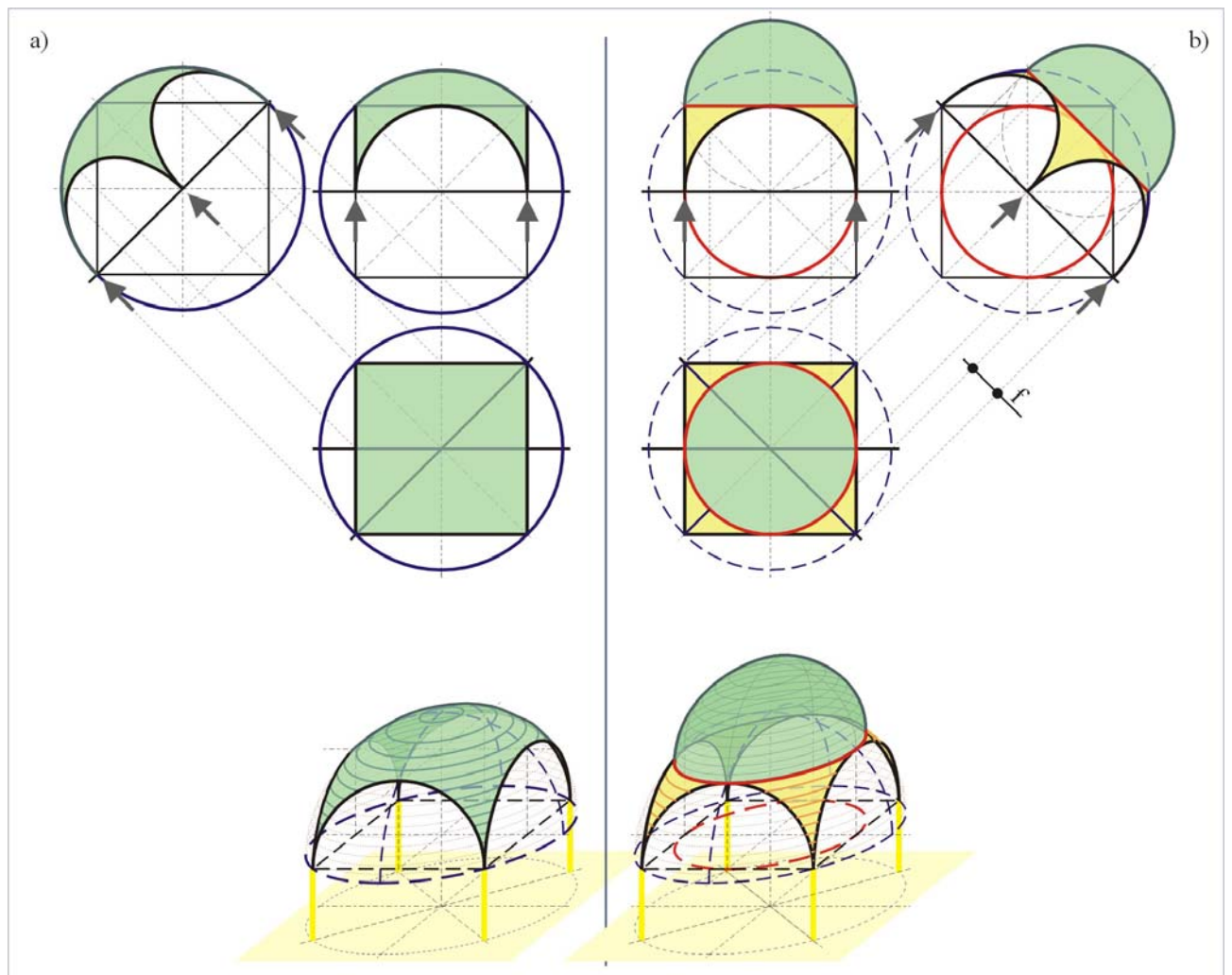


Bild 2.3.15: Geometrische Entwicklung von Grund- und Aufriß, Auflagerreaktionen und perspektivische Prinzipdarstellung.

- a) Außenkreiskuppel (Hängekuppel) über Vierungspfeilern.
- b) Innenkreiskuppel (Pendentivkuppel) über Vierungspfeilern.

Bild 2.3.16: Halbkugelkuppel mit dünner Kuppelschale über einem oktagonalen Gurtbogenring. Einbeschreibung des Kuppelaußenkreises. Umbeschreibung des Kuppelinnenkreises.