

Analyse

„... das katalanisches Gewölbe“

von Juliane Vymetal, WS 2004, Hochbau für Architekten V (270.102), TU Wien

Inhaltsverzeichnis

1. Katalanisches Gewölbe	3
1.1 Form	3
2. Das hyperbolische Paraboloid	4
3. Das elliptische Paraboloid	6
4. Beispiele der jüngeren Architektur	7
4.1 Felix Candela	7
4.2 Heinz Isler	9
4.3 Le Corbusier	10
4.4 Vladimir Suchov	10
5. Technik	11
6. Die Alte Technologie · Entstehung und Entwicklung	12
6.1 Santa Maria del Mar	13
6.2 Palau de la Música Catalana	13
7. Herstellung	15
8. Vollendung durch Gaudi	16
8.1 Statik	16
8.2 Colegio Teresiano	18
8.3 Bellesguard (schöne Aussicht)	19
8.4 Casa Milá · das Dach	20
8.5 Crypta des Palacio Güell	21
8.6 Technik	22
8.7 Schule Sagrada Familia	24
9. Literaturangaben	25
10. Abbildungsverzeichnis	26

1. Katalanisches Gewölbe

Es stellt sich zuerst einmal die Frage: Was ist ein katalanisches Gewölbe? Gibt es einen solchen Begriff wirklich, oder ist er nur zusammengesetzt aus 2 Wörtern die es zu untersuchen gilt? Wenn es diesen Begriff gibt, beschreibt er einen bestimmten Gewölbetyp oder geht es um eine Eigenart einer Region?

Die ersten Recherchen zu diesem Thema dauerten lange an. Denn der Begriff des katalanischen Gewölbes war zuerst in keiner einschlägigen Literatur zu finden. Die ersten Schritte führten dann jedoch zum berühmten katalanischen Architekten Gaudi, dessen Gebautes so gut wie immer Gewölbearchitektur beinhaltete und fast ausschließlich in Katalonien steht.

In den nächsten Schritten kam ich durch 3 verschiedenen Quellen dem Begriff des katalanischen Gewölbes näher. Durch diese 3 Quellen möchte ich mich in der Analyse dem Thema des katalanischen Gewölbes annähern und versuchen diesen Begriff genauer zu definieren.

1.1 Form

Klar ist, dass der Begriff des katalanischen Gewölbes etwas mit Gaudi zu tun hat, da es bei seiner Architektur vermehrt und vertiefend um Gewölbeformen geht. Wichtig ist aber auch die nochmalige Frage nach dem Begriff – gibt es den Begriff „das katalanische Gewölbe“ wirklich oder ist es nur eine zusammengesetzte Phrase. Auf der Suche nach dem Begriff in einschlägiger Literatur über Gewölbe und Kuppel fand ich schließlich jenen Satz: *„Zu den doppelt gekrümmten Flächen zählen wir weiterhin u.a. die Konoid-Schalen, die EP-Schalen (elliptische Paraboloid, auch katalanische Gewölbe genannt) und die HP-Schale (hyperbolische Paraboloid).“¹*

Daher werde ich mich im 1. Kapitel vermehrt mit dem Thema der Form eines katalanischen Gewölbes beschäftigen, denn das ist ein ausschlaggebender Punkt.

Schalen verdanken ihre Festigkeit nicht primär der Festigkeit ihres Werkstoffes wie bei einer Stütze, sondern dessen räumlicher, dreidimensionaler Anordnung. Als Veranschaulichung ein Blatt Papier: Wenn es am Rand festgehalten wird und als Platte frei auskragt, hängt es herunter. Es werden nur die Festigkeiten der Randfasern ausgenutzt, die Spannungen in der Blattmitte bleiben bei 0. Wird es an 2 Punkten senkrecht aufgehängt, wirkt es wie eine Scheibe mit minimalen Verformungen und Spannungen. Es handelt sich hier um Membranspannungen. Wird das Blatt zylindrisch gekrümmt, dann kann es plötzlich tragen, uns schützen. Schalen kombinieren daher die Wirkung der Platten und Scheiben.

¹ Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003, S44.

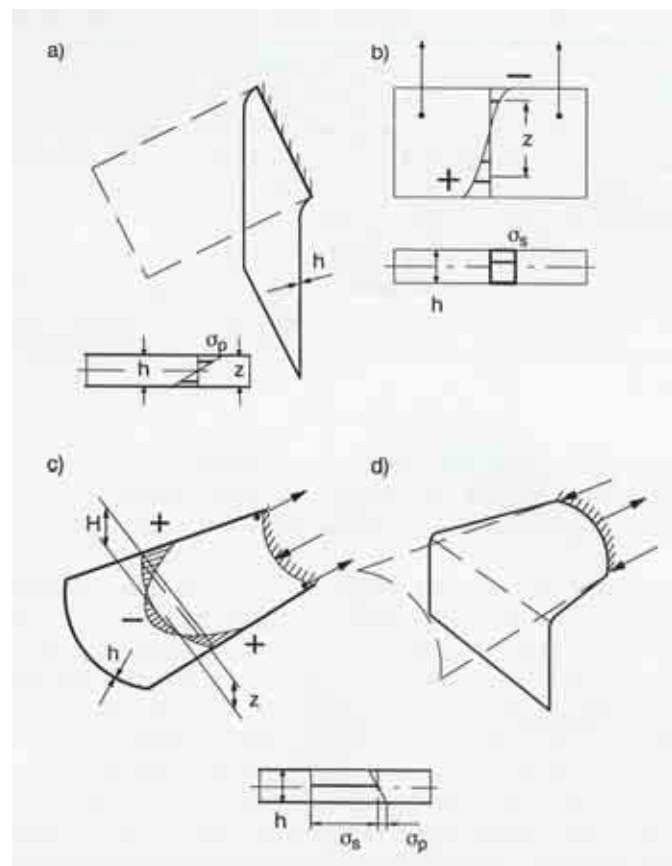


Abb. 1: Heinle; Schlaich, Kuppeln

2. Das hyperbolische Paraboloid

Das hyperbolische Paraboloid (Sattelfläche) ist mathematisch betrachtet eine Fläche zweiter Ordnung. Das bedeutet, dass jeder Schnitt mit einer Ebene einen Kegelschnitt ergibt. In diesem Fall sind das:

- bei senkrechten Ebenen: Parabeln,
- bei waagrecht oder beliebig geneigten Ebenen: Hyperbeln.

Eine solche Fläche bezeichnet man auch als eine antiklastisch (= gegensinnig) gekrümmte Fläche und es ist eine nicht abwickelbare Fläche. Ein hyperbolisches Paraboloid ist doppelt / zweifach gekrümmt (= „*Catalansche Fläche*¹²): konvex und konkav. Dadurch sind HP-Schalen sehr steif. Die Kräfteübertragung ist bei der HP-Schale sehr einfach. Die Schale besteht nämlich aus einer Reihe von Druckparabeln und Zugparabeln. Die Resultierenden der Druck- und Zugkräfte fallen im Rand der Schale zusammen. Das Eigengewicht der Schale wird also ausschließlich als Normalkraft zu den Punkten A und B abgeleitet.

Die Gleichung des hyperbolischen Paraboloids lautet: $x^2 / a^2 - y^2 / b^2 - 2z = 0$

¹² FH Nürnberg: Schalenträgerwerke als Hyperbolische Paraboloid, <http://www.flair-twl.de/download/hypar.pdf>

Erzeugen kann man die Fläche, indem man eine hängende (nach unten offene) Parabel entlang einer stehenden Parabel, die nach oben offen ist, verschiebt. Interessant ist, dass es jedoch auch durch zwei Scharen von Geraden dargestellt werden kann. Das bedeutet, dass das hyperbolische Paraboloid auch aus geradlinigen Elementen (Seilen, Stahlträgern) konstruiert werden kann.

Daher wird das hyperbolische Paraboloid in der modernen Architektur oft als Dachfläche eingesetzt. Zur Konstruktion stelle man sich eine quadratische Grundfläche vor, die jeweils gegenüberliegenden Dachpunkte sind gleich hoch bzw. die anderen 2 Punkte sind tiefer. Wenn man diese Punkte verbindet, hat man schon 4 erzeugende Geraden. Halbiert, bzw. viertelt man diese Geraden und verbindet die gegenüberliegenden Punkte miteinander, entstehen weitere windschiefe Geraden, die das hyperbolische Paraboloid bilden.

Bei dieser Dachform trägt nicht etwa der First und die Gaube wie bei anderen Dächern, sondern die Last wird von der Schale selbst getragen. Das Dach trägt sich selbst. Man spricht von einem Schalentragerwerk. Werden die beiden Tiefpunkte noch zusammengespannt (z.B. durch ein Stahlseil) so erhält das Dach noch einmal höhere Festigkeit. Auch das Regenwasser fließt nicht mehr in eine lange Gaube, sondern sammelt sich an den Tiefpunkten des Daches, nur dort muss an einen Abfluss gedacht werden. Diese Dachform entsteht auch, wenn eine Plane zwischen vier ungleich hohen Punkten aufgespannt wird. Daher gebraucht man sie auch als Zeltdach für Gärten.

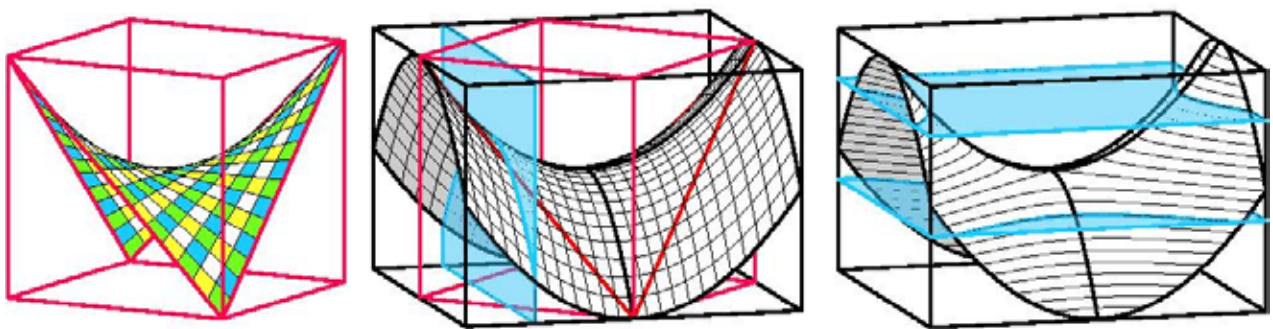


Abb. 2: Hyperbolische Paraboloid

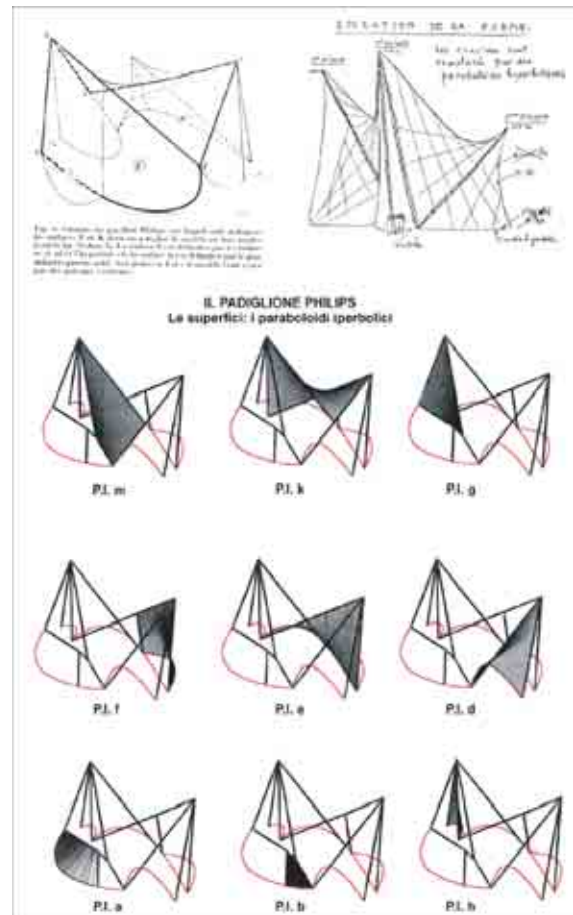


Abb. 3: HP-Dachformen

Vorteile der HP-Schale als Bauform:

- ästhetisch ansprechende Form,
- herstellungstechnisch günstige Form → 2 Scharen Erzeugende, bei Betonschalen werden dann in eine Richtung Schalbretter, in der anderen Kanthölzer des Gerüsts verlegt,
- günstiges Tragverhalten mit ziemlich gleichmäßiger Schnittkraftverteilung bei entsprechender Lagerung und relativ günstigem Stabilitätsverhalten.

Flache Schalen können normal betoniert werden und mit einem Flächenrüttler verdichtet werden. Die maximale Korngröße soll 7 mm nicht überschreiten. Steile Schalen werden im Spritzbetonverfahren erstellt. Das Aufbringen des Betons erfolgt von unten nach oben. Beim Ansetzen neuer Betonierabschnitte sind die Stirnflächen vom lockeren Gefüge zu säubern. Die richtige Dicke wird von Nägeln kontrolliert die in die Schalung genagelt werden.

3. Das elliptische Paraboloid

Ebenenschnitte ergeben:

- bei senkrechten Ebenen: Parabeln,
- bei waagrechten oder beliebig geneigten Ebenen: Ellipse.

Eine solche Fläche bezeichnet man auch als eine synklastische (= gleichsinnig) gekrümmte Fläche.

Die Gleichung des elliptischen Paraboloids lautet: $x^2 / a^2 + y^2 / b^2 = z$

Das elliptische Paraboloid ist eine Rotationsschale. Erzeugen kann man die Fläche, indem man eine Parabel entlang einer Ellipse verschiebt, oder umgekehrt, wobei die Kurve stets zur Achse hin gekrümmt sein muss.

Eine EP-Schale ist eine doppelt gekrümmte Fläche, deren horizontaler Querschnitt elliptisch und deren vertikaler Querschnitt parabolisch ist.

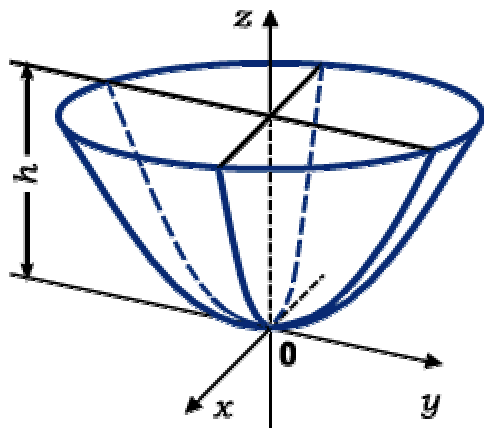


Abb. 4: Paraboloid

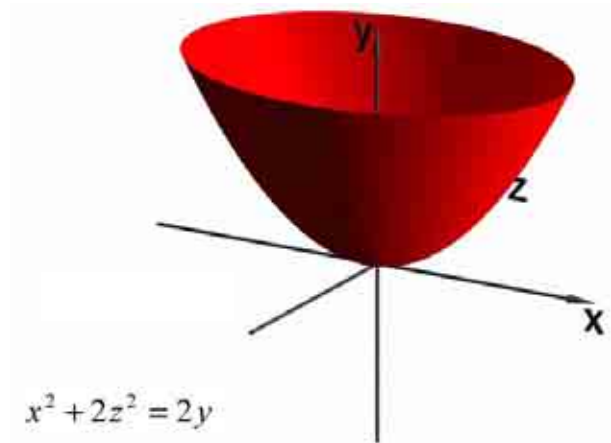


Abb. 5: Paraboloid

4. Beispiele der jüngeren Architektur

4.1 Felix Candela

Kirche der Wundertätigen Jungfrau „La Milagrosa“, Narvarte, Mexiko, 1955

Das Bauwerk ist eine Kombination windschiefer Flächen, alle Paraboloiden (außer der kleinen Seitenkapelle) mit der üblichen Plattendicke von 4 cm oder weniger. Sogar der schlanke Glockenturm besteht aus windschiefen Flächen. Die Stützen des Hauptschiffes sind windschief wie die von ihnen getragenen Schalen. Sie waren so entworfen, um mit dem Dach eine Einheit zu bilden, im übrigen aber auch aus einem intuitiven Gefühl für die konstruktiven Erfordernisse. Die Basis wurde so dimensioniert, dass sie ein durch einen etwaigen Auswärtsschub hervorgerufenen Moment aufnehmen konnte. Erst nachher stellte sich heraus, dass die resultierenden Schrägkräfte durch den Schwerpunkt der dreieckigen Grundfläche geht, und, dass die Stütze in Wirklichkeit nur auf Druck beansprucht wird.



Abb. 6: La Milagrosa



Abb. 7: Innenraum der Kirche

Kapelle El Atillo

Der rhombische Grundriss ist mit einem eleganten doppelt gekrümmten Blatt überdacht, welches 36 m lang und 28 m breit ist. Die Materialien der Kapelle sind so einfach wie ihre Konstruktion. Die Böden sind mit einer Art schwarzer Lava bedeckt. Die Außenmauern sind auch aus vulkanischem Stein, aber rauer und nicht so dunkel. Der sichtbare Beton wurde nicht bearbeitet. Das Dach ist mit einem Blatt Papier verglichen worden, das leicht vom Wind verdreht ist. Auf seinen unteren Ecken sitzend, steigt es auskragend zu den Spitzen an. Da der Schub der beiden Kragarme verschieden ist, wurde der kürzere an Betonmauern befestigt. Die stählernen Fenstersprossen geben sekundäre Unterstützung, um eventuelle Biegungen nach oben oder unten durch Temperaturschwankungen zu vermeiden. Die Konstruktion besteht in einem einzigen hyperbolischen Blatt, dass durch gerade Erzeugende begrenzt ist. Die Achse dieses Paraboloids ist nicht senkrecht. Deshalb haben die Lasten Komponenten entlang aller 3 Achsen, woraus sich eine komplizierte Spannungsaufstellung ergibt. Schrägspannungen mussten entlang beider Seiten des auskragenden Teils aufgehoben werden, da dort nichts war, um sie aufzunehmen. Da jede Erzeugende wie ein Zugband wirkt, konnten die Spannungen an die entsprechenden Punkte der gegenüberliegenden Kanten übertragen werden, wo sie die auf Biegung beanspruchte Betonmauer aufnimmt.



Abb. 8: Kapelle El Atillo

Restaurant in Xochimilco

Das Bauwerk in Xochimilco ist ein achteiliges Kreuzgewölbe, das aus vier sich durchdringenden Paraboloiden besteht. Candela hält dieses Bauwerk für seine bedeutendste Arbeit. Es ist in der Tat unübertrefflich und hat alles, was eine Schale sein soll: einfach, graziös und leicht. Es ist sicher die zarteste Betonmembrane über einer solchen großen Spannweite. Dank der Einfachheit eines hyperbolischen Paraboloids konnte die Fähigkeit der Schale, ohne Randspannungen auszukommen, mit Leichtigkeit mathematisch ausgedrückt werden. Unerwünschte Randspannungen werden durch die Erzeugenden auf die Grate übertragen. Da die Schale symmetrisch ist, liegen resultierende Kräfte in den Ebenen der Grate.

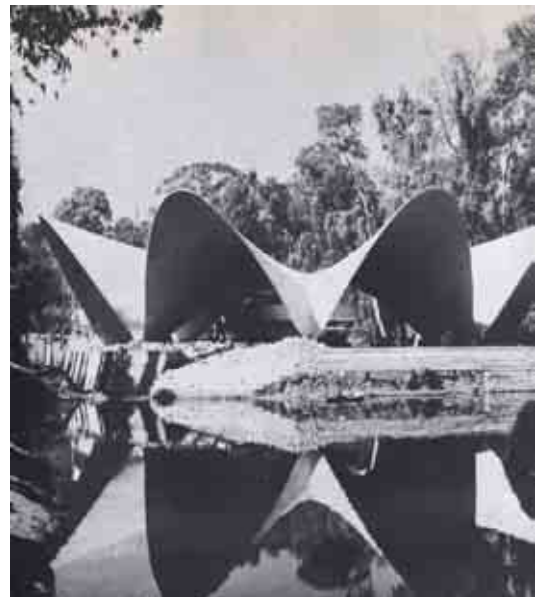


Abb. 9: Restaurant in Xochimilco

4.2 Heinz Isler

Naturtheater

Die Spannbetonschale überdacht einen Zuschauerbereich von 28 m * 42 m für 800 Personen. Sie ist auf 5 Punkten mit unterschiedlichem Höhenniveau gelagert. Fassaden sind keine geplant, können aber im nachhinein eingebaut werden.

Die Schalenform wurde im Hängeversuch ermittelt. Damit weist das Betondach vorwiegend Druckspannungen auf, sodass keine Risse zu erwarten sind. Auch ohne Dacheindeckung bleibt sie dicht und unterhaltsfrei. Alle Schalungsbinder unterscheiden sich voneinander. Die Formen werden im Modell genau herausgemessen und nach der Formkurve werden die Holzlehre aus aufgestellten Brettern herausgeschnitten. Sie sind das Gerippe der Schalung. Darauf kommt die Lattung, dann Sperrholzplatten und danach Holzfaserplatten.



Abb. 10: Naturtheater

4.3 Le Corbusier

Häuser Jaoul

„Le Corbusier verwendete das primitivste und herkömmlichste Material: Backstein, Flachziegel, sogenannte 'katalanische Gewölbe' aus sichtbaren Flachziegeln, Gras als Dachbelag. Die nach dem Modulor bestimmten Hauptmaße sind: Spannweiten von 3,66 m, Höhe bis zum Gesims 2,26 m.“³



Abb. 11: Jaoul



Abb. 12: Jaoul

4.4 Vladimir Suchov

Suchov erstellte auf einer Ausstellung 1896 seinen ersten Turm der die Form eines Hyperboloids hatte. Statische Analysen hatten ihn hin zu gekrümmten Gitterflächen geführt, die aus identischen Elementen und mit gleicher Maschengröße gefertigt werden konnten. Solche Flächen lassen sich geometrisch verzerren ohne Verlust ihrer formaler Eigenschaften. Sie lassen sich sogar kontinuierlich in andere Regelflächen überführen. Das Hyperboloid lässt sich durch Drehung der Geradenscharen entlang den begrenzenden Kreisen überführen zu einem Zylinder. Suchov nutzte diesen Effekt für seine Entwürfe. In Suchovs Werk nehmen, in Zusammenhang mit der Anwendung von Regelflächen die Türme mit Hyperboloid-Form einen wertvollen Platz ein, denn das Hyperboloid wird bei Turmkonstruktionen in unglaublicher Vielfalt und für unterschiedlichste Zwecke verwendet. Grundtyp ist ein Hyperboloid dessen Geradenscharen aus Stahlprofilen bestehen, die miteinander vernietet sind. Die eine Schar befindet sich innerhalb, die andere außerhalb der geometrischen Ausgangsfigur. Die geraden Profile sind im Fundament und am oberen Turmrand an einem Ring befestigt. Dieser Ring ist normalerweise auf Zug beansprucht, wurde aber, um unregelmäßige Lastverteilungen aufnehmen zu können, biegesteif ausgeführt. Die geraden Profile sind mit weiteren Ringen, die regelmäßig über die gesamte Turmhöhe verteilt sind, verbunden. Sie sind über die kurzen Strecken zwischen den Verbindungsstellen auf Biegung belastbar und bilden mit den geraden Profilen Dreiecke, die das Gitter erst verformungssteif machen. Die Ringe werden meist zwischen und nicht an den Kreuzungsstellen der beiden Geradenscharen angeordnet, da immer nur 2 Elemente in einem Knotenpunkt verbunden sind. So wird die Konzentration der Lasten verringert. Um eine stabile Gesamtform zu

³Kühn, Hermann: Le Corbusier 1887 – 1965, TU Harburg, 1997, <http://www.tu-harburg.de/b/kuehn/lec14.html>

erhalten, ist der obere Ring immer kleiner als der untere. Bei den besonders hohen Türmen, die aus der Addition übereinandergestapelter Hyperboloide bestehen, ergibt das eine kegelähnliche Gesamtform. Im Oberteil kommt es dabei manchmal zu einer Halbierung der Anzahl der geraden Stabelemente.



Abb. 13: Suchoy, Wasserturm

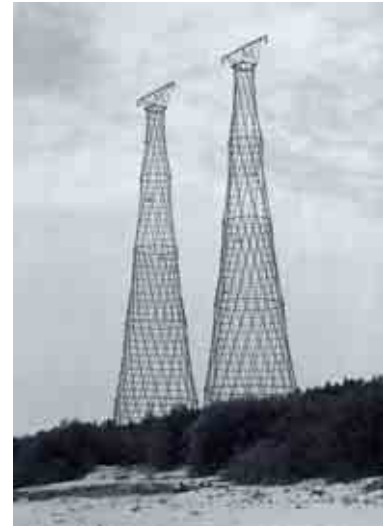


Abb. 14: Suchoy, Stromleitungs-
masten

5. Technik

Immer öfter fand ich Zusammenhänge zwischen Gaudi und doppelt gekrümmten Flächen. Außerdem las ich heraus, dass es eine sogenannte katalanische Wölbtechnik geben musste. Denn weiter im Text in einem Buch über Gaudi: *“Diese Dächer wurden aus zwei Lagen katalanischer Ziegelsteinkachel unter Verwendung eines leimartigen, gipshaltigen Mörtel gemauert.”*⁴

Außerdem in einem anderen Buch über Wölbtechniken: *“Stärker noch sprechen uns die Bauten an, in denen er [Gaudi] sich der uralten katalanischen Technik des Ziegelleichtgewölbes oder Lamellengewölbes bedient: Flachziegel in zwei Lagen, die untere in Gipsmörtel, über leichten Lehrbögen freihändig gewölbt und trotz des meist flachen Profils von erstaunlicher Tragkraft.”*⁵

Weiters fand ich im Internet ein Gespräch über das katalanische Gewölbe in dem es unter anderem lautet: *“Beim katalanischen Gewölbe handelt es sich um eine Leichtbauweise.”*⁶ Bei diesem Internetgespräch handelt es sich um eine Diskussion um den Begriff des katalanischen Gewölbes, wie dieses konstruiert wird, was es für Eigenheiten aufweist, ab wann es dieses gegeben haben soll und ob diese Gewölbeart auch im deutschsprachigen Raum Verwendung fand. Unter anderem verweisen die Gesprächspartner auch auf Forschungsberichte. Ich habe mich mit den Gesprächspartnern in Verbindung gesetzt und so auch noch zusätzliche Informationen bekommen. Diese Quellen sind Gegenstand des nächsten Kapitels,

⁴ Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003, S47.

⁵ Hart, Franz: Kunst und Technik der Wölbung, Verlag Georg D. W. Callwey München, 1956, S87.

⁶ Diehl, Karl- Ludwig: <http://websee.de/Forschungsbericht.html>, websee.de, 2001

es zeigt aber auch, dass man sich über den Begriff des katalanischen Gewölbes noch nicht ganz im Klaren ist.

6. Die Alte Technologie · Entstehung und Entwicklung

Das katalanische Gewölbe kennt eine lange Geschichte. Die Römer, experimentierfreudig in Sachen Ziegeltechnik, brannten häufig Flachziegel mit hohen Temperaturen. Quadratische Ziegel, an vier Ecken aufgelegt auf Säulchen wurden in römischen Bädern verwendet. Sie waren also begehbar und beständig gegen gewisse Biegekräfte. Auch dreischichtige Bänder aus Ziegelmauerwerk als Bewehrung im römischen (und späteren) Bruchsteinmauerwerk, deuten auf die gute Belastbarkeit solcher Ziegel hin. Später - im Mittelalter - wurde aus dieser Bautradition im westlichen Mittelmeerraum das Gewölbe „a la catalana“ entwickelt. Neben Gewölbe sind hier auch gemauerte Terrassen und Flachdächer zu nennen, wodurch das in Spanien seltene Bauholz eingespart wurde.

Ziegel wurden zum Bauen in Katalonien schon in römischer Zeit verwendet und besonders während der Gotik in höchster Vollendung eingesetzt, sodass sie im 18. Jahrhundert den Stein nahezu verdrängt hatten. Die „Bóvedas tabicadas“ gewinnen in Verbindung mit diesem Material, vor allem in Katalonien, an großer Bedeutung. Es handelt sich dabei um eine flache zweischalige Wölbung, bei der die Ziegel in der einen Schicht gegen die anderen etwas verdreht werden. Dies führt zu einer sehr vorteilhaften Ableitung und Stabilisation der Kräfte. Außerdem ist der Gerüstaufwand beim Bauen für diese durch Mörtel gefestigten Gewölbeschichten minimal. Weitere Begriffe für diese Wölbtechnik „trimble vaults“, „catalan vault“, „Roussillion vault“, „boveda catalana“.

Diese Technik steht sowohl für Fortschritt, als auch für Tradition, sie wird vor allem mit Katalonien, als „Entstehungsort“, in Verbindung gebracht. Diese Technik gibt es aber nicht erst seit dem katalanischen Mittelalter, sondern seit den Römern und manche Charakteristiken kann man schon bei den Ägyptern und den Mauren erkennen. Wo und wann man die markanten Punkte in dieser Entwicklung auch setzen mag, sicher ist, dass sie vor allem in Katalonien seit jeher eine herausragende Rolle spielt. Katalonien hat diese uralte Deckenkonstruktion sozusagen zur Vollendung geführt, jedoch sicherlich nicht erfunden.

Zu den herausragendsten Beispielen dieser alten Technik in der Mittelalterlichen Architektur Barcelonas gehören der Salón Tinell. Santa María del Mar (14. Jahrhundert), Häuser in der Calle Moncada (14. bis 17. Jahrhundert), Santa María del Pino (15. Jahrhundert) und das Hospital de la Cruz (frühes 15. Jahrhundert).



Abb. 15: Santa Maria del Mar



Abb. 16: Salon de Tinell

6.1 Santa Maria del Mar

Es handelt sich um ein Musterbeispiel der katalanischen Gotik. Innen ist vor allem die enorme Höhe des Mittelschiffs auffällig. Sie ist ein Werk des Architekten Berenguer de Montagut und war die Kirche der Reeder und Händler des gotischen Barcelonas. Von Außen betrachtet sieht sie durch die vornehmlich geraden Linien massiv und robust aus. Innen weist sie drei Schiffe mit Deambulatorium und ohne Kreuzgang auf. Hervorzuheben ist die beachtliche Höhe des Mittelschiffs mit seinen majestätischen achteckigen Säulen. An der Stelle, wo heute die Kirche steht, befand sich zwischen dem 4. und 6. Jhd. eine römische Nekropolis, die während der Bauarbeiten der sechziger Jahre zu Tage trat.

Die große Fensterrosette aus dem 15. Jahrhundert sind besonders sehenswert in dieser sinnbildlichen Kirche, ebenso wie die Skulpturen, die sich Tympanon und an den Seiten der Fassade befinden. Bernat Lull war der Initiator dieses Baus, der von Guillem de Montagut durchgeführt wurde.

Spätestens im 19. Jahrhundert kommt dieser besonderen Wölbtechnik wieder besondere Bedeutung zu. In den Werke von Domènech i Montaners wird die Technik der bóveda tabicada wieder aufgelebt. Im Palau de la Música Catalana verwendet er das katalanische Gewölbe.

6.2 Palau de la Música Catalana

Der Katalanische Musikpalast ('Palau de la Música Catalana') in der Calle de Sant Pere Mes Alt in Barcelona ist ein Konzertsaal, der von Lluís Domènech i Montaner (1850-1923) entworfen und 1908 eingeweiht wurde. Innen wirkt er wie eine durchgängige Skulptur, wobei Gruppen wie 'Die Walküren' oder das spektakuläre Fenster am höchsten Punkt von Rigalt i Granell hervorzuheben sind. Das Hospital de Sant Pau in der Calle Sant Antoni María Claret ist ein Vorhaben aus dem Jahre 1901, das 1913 mit dem Preis der Stadtverwaltung Barcelona ausgezeichnet wurde. Das ursprüngliche Projekt sah den Bau von 48 Pavillons vor, aber am Ende wurden nur 27 errichtet. Es handelt sich um ein Werk von höchst komplexer Ausfüh-

rung, wie sich an der Zeit, die es zu seiner Fertigstellung brauchte (von 1901 bis 1930) ablesen lässt. Aus dem Gesamtwerk sticht der Verwaltungspavillon und die beeindruckende Kirche hervor.

Auch aus Gründen des feuersicheren Bauens kommt es zur Reaktivierung dieser Ziegeltechnik. Außerdem waren es die beiden Gustaviano Brüder, ursprünglich aus Genua, die diese Wölbtechnik nicht nur in Bauten verwendeten und dies im internationalen Maßstab, sondern auch durch viele Schriften propagandierten und gleichzeitig theoretisch fundierten. Gustavianos Gewölbe kann man in zahlreichen Gebäuden bewundern, unter anderem im Grand Central Terminal, im U.S: Customs House und in der Haupthalle auf Ellis Island.

Weiters finden wir diese Bauweise auch im katalanischen landwirtschaftlichen Bau vor, unter anderem bei den Bodegas (= Weinkeller) der Architekten Martinell und Puig i Cadafalch.

Wie kommt es, dass das katalanische Gewölbe ab 1870 in Barcelona und ab 1885 in den USA eine Wiedergeburt erfuhr? Gegen die Konkurrenz neuer Bausysteme aus Stahl und (später) Beton wollten sich die traditionellen Baufirmen wirtschaftlich behaupten. Das katalanische Gewölbe konnte aufwarten mit geringen Materialmengen und einer entsprechenden Transport- und Lagerreduzierung. Die Technik des freihändigen Vermauerns sparte nicht nur die Schalungen ein, sondern ermöglichte auch leichtere Arbeitsgerüste. In den USA beruhte Guastavinos wirtschaftlicher Durchbruch auch auf der Feuersicherheit, die bei Stahl so enttäuscht hatte. Insbesondere in monumentalen Kuppelbauten war er meist erfolgreicher gegenüber den Konkurrenten mit ihren abgehängten Gipsattrappen, massiven abgestrebten Gewölben oder teuren Betonflächen an Rippen. Die Feuersicherheit der leichten katalanischen Gewölbe war auch schon 1754 von Le Comte d'Espie erkannt worden. Die Entdeckung wurde seit 1800 durch Baubüchern in Frankreich – und durch Übersetzungen auch in Deutschland – verbreitet, etwa durch Pierre Patte und Jean-Baptiste Rondelet. Das Ergebnis waren Vorschläge für Decken und Dächer in Ziegel für mehrstöckige Häuser, denen allerdings in der Baupraxis damals eher ein geringer Erfolg beschieden war.

Eine wenig bekannte spätere Entwicklung der katalanische Gewölbe soll hier kurz genannt werden. Dem Spanischen Bürgerkrieg (1936 - 1939) folgte ein wirtschaftlicher Zusammenbruch. Die rückwärtsgerichtete Politik unter General Franco förderte daraufhin solche Ansätze in der Technik, welche die Verwendung der Importware Eisen einsparte. Dabei spielte eine romantische Verklärung des Handwerks gegenüber dem kapitalistischen und bolschewistischen Industriebetrieb eine gewisse Rolle. Der Architekt Francisco Cabrero verwendete katalanisches Gewölbe in Deckenkonstruktionen, z. B. in mehrstöckigen Wohnzeilen Grupo Virgen del Mar (1948 - 1949). Serien von Tonnen sind dabei durch strebende Endmauern und wenige kontinuierliche Eisenanker gesichert. Von Cabrera sind auch die Messebauten des Feria del Campo in Madrid (1948 - 1949), die gegenüber anderen Beispielen neubarocken Stiles frisch herausragen.

Heute lebt die Frage wieder auf, warum es katalanisches Gewölbe heißt, was ein solches Gewölbe als katalanisch auszeichnet und zu einem solchem macht. Wie soll man also erkennen, was so entscheidend an dieser Konstruktion ist, dass es als typisch für diese Region gilt. Außerdem ist die innere Konstruktion

nicht einsichtig, sozusagen unsichtbar und daher ist ein Gewölbe nicht oft, klar als ein Gewölbe dieser Art definierbar.

7. Herstellung

Die katalanische Wölbtechnik ist eine sehr alte Technologie, die im Mittelmeerraum eine Rolle spielte und weltweite Auswirkungen hatte. Es handelt sich um eine Wölbungstechnik, bei der flache Ziegel in Schichten von einem Wölbungsansatz nur über Richtungsgebern ohne Schalung aufgemauert werden. Es werden Flachziegel vom Format 15 x 30 x 1,5 cm in zwei oder drei Schichten flach zu schwach ausgeprägten Kuppelformen vermauert. Voraussetzung waren schnellabbindende Mörtel, die ein Ankleben der flachen Ziegel an den Wölbungsansatz ermöglichten. Die Ziegel liegen dabei nicht "hochkant", sondern flach. Sie werden meist in drei Schichten verklebt, sodass die Fugenverläufe in der ersten Schicht zur zweiten Schicht um 45 Grad etwa versetzt lagen, sodass die dritte Schicht ihre Fugen um 90 Grad zur ersten Schicht hatte. Die Fugen dürfen sich nur kreuzen, aber nicht aufeinanderliegen. Das Fugenbild ist überlappend oder wechselt in diagonaler Richtung. Der Mörtel für die unteren beiden Schichten ist gipshaltig.

Spätere Druckproben dieses Mauerwerkes zeigen, dass bei Überbelastung die Risse quer durch das Mauerwerk gehen, also nicht unbedingt entlang der Fugen. Wegen der Tendenz des gipshaltigen Mörtels, Wasser aufzunehmen und nachträglich aufzuweichen, wird die obere Schicht mit hydraulischem Zementmörtel, z.B. Portlandzement, vermauert. In wenigen Sekunden härtet der Mörtel und diese Klebeeigenschaft bewirkt, dass man problemlos an eine bestehende Ziegelschicht von unten einen Ziegel anfügen kann. Die Kohäsionswirkung des Bindemittels zwischen den Schichten erlaubt eine Zugkraft in gewissem Umfang, sodass frei aufgemauert werden kann. Bei Kuppeln kann sogar auf der gerade erst gemauerten Schale stehend weitergearbeitet werden, um die nächsten Ringe und Schichten darüber im freien Vorbau zu mauern, ohne dass eine Schalung benötigt wird.

Bis fast 50 m Spannweite wurden solche Kuppelschalen frei aufgemauert. Voraussetzung ist eine korrekte annähernd parabolische Krümmung der Schale, sodass zwischen den einzelnen Steinen nur Druckkräfte entstehen.

Die Wirtschaftlichkeit des katalanischen Gewölbes liegt einmal in der Tatsache, dass es von guten Mauern freihändig ausführbar ist und andererseits in der großen Formenvielfalt, die dabei zur Auswahl steht. Die Dicke der Gewölbe beträgt also nur etwa 5 bis 10 cm. Später wurden, wegen der günstigen Dämmungseigenschaften und zur Vermeidung der Beulgefahr auch flache Hohlziegel von 5 cm Dicke oder weniger eingesetzt.

Zur Bezeichnung "Katalanisches Gewölbe": Unter Fachleuten ist die Zuordnung der Flachziegelgewölbe als katalanisch umstritten. Einerseits kann man feststellen, dass die katalanische Kultur eine eigene, unverwechselbare Bautradition zeigt, die etwa in der Gotik (Kathedrale und Lonja in Palma de Mallorca, Kathedrale in Gerona, Santa Maria del Mar in Barcelona, sowie die Wohn- und Geschäftshäuser dieser Epo-

che) konstruktive Spitzenleistungen hervorbrachte. Der Einsatz von Flachziegelgewölben ist dabei meist nicht vordergründig, sondern fügt sich ein in eine große Zahl origineller Ansätze in der Steinarchitektur, wie das Diaphragmasystem (Scheibenbögen), Konsolen als Gewölbeauflager bis hin zu konstruktiven Spielereien. Andererseits sind seit dem 12. Jhd. an vielen Stellen im westlichen Mittelmeerraum Flachziegelgewölbe gebaut und ihr katalanischer Ursprung ist nicht bewiesen. Häufig verwendete Bezeichnungen sind: englisch – catalan vault; spanisch – bóveda tabicada, bóveda a la catalana, bóveda de ladrillos de plano; katalanisch – voltes de maó de plà.

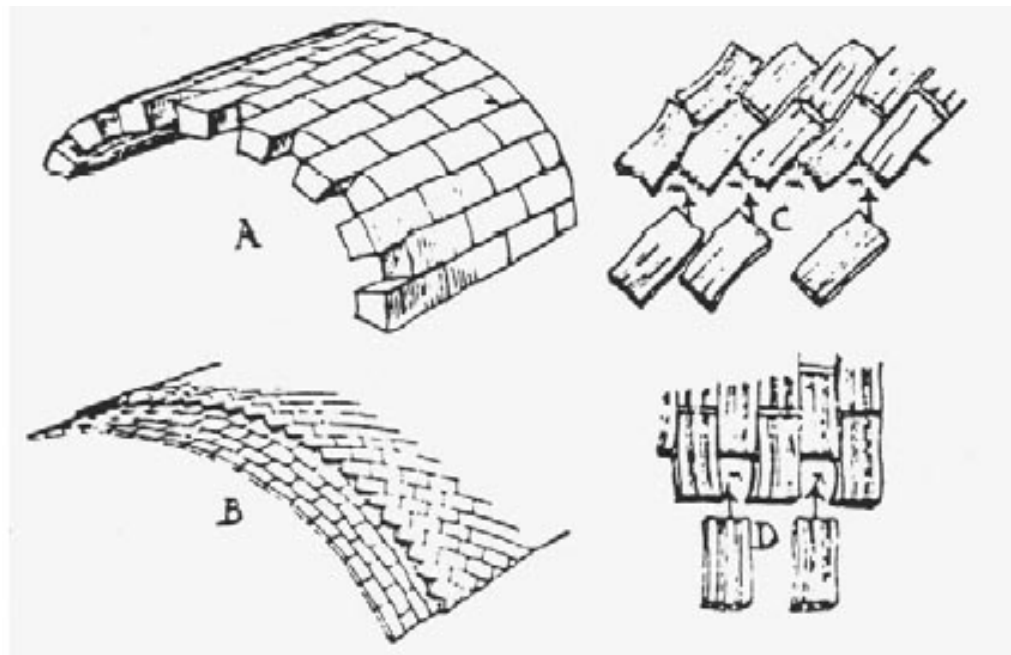


Abb. 17: katalanische Gewölbetechnik

8. Vollendung durch Gaudi

Der Begriff des katalanischen Gewölbes ist schwer zu finden und auch nicht vollkommen ausdefiniert. Jedoch verbindet man mit katalanischer Architektur sehr schnell Gaudi und bei näherem Betrachten seiner Werke wird auch schnell klar, dass das Gewölbe ein sehr vielfältig behandeltes Thema in Gaudis Schaffen ist. Eines der auffallendsten und gleichzeitig wichtigsten Leitmotive in Gaudis Werk sind die bogenförmigen Tragwerke. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Werke Gaudis, im Bezug auf Gewölbearchitektur, näher beschrieben und charakteristische Details eines katalanischen Gewölbes herausgearbeitet werden.

8.1 Statik

Statisch gesehen ist der parabelförmige Bogen eine logische Tragwerkform, weil dieser bei einer gleichmäßigen Belastung der Stützlinie entspricht. Um einen Abstand zu überbrücken kann man steile oder flache Parabeln verwenden, solange der Bogen unter Gleichlast die Form der Parabel aufweist, treten fast nur Druckkräfte auf. Je größer der Stich, das heißt je höher der Bogen ist, umso kleiner ist die horizontale Komponente H an den Widerlagern.

Ein Bogen in Form eines Halbkreises ist ungünstiger als eine Parabel, weil durch die Abweichung von der Stützlinie Biegemomente entstehen. Mit Hilfe der modernen Wissenschaft – der Statik – konnte Gaudi die konstruktive Entwicklung von Bogen und Gewölbe, die nach der Gotik zum Stillstand kam, weiter führen. In der Gotik verwendete man noch schwere Strebepfeiler um Seitenschübe aufzufangen. Gaudi hingegen verwendete Tragwerke mit parabelförmiger Leitlinie, die dann den Verzicht auf Hilfskonstruktionen möglich machte.

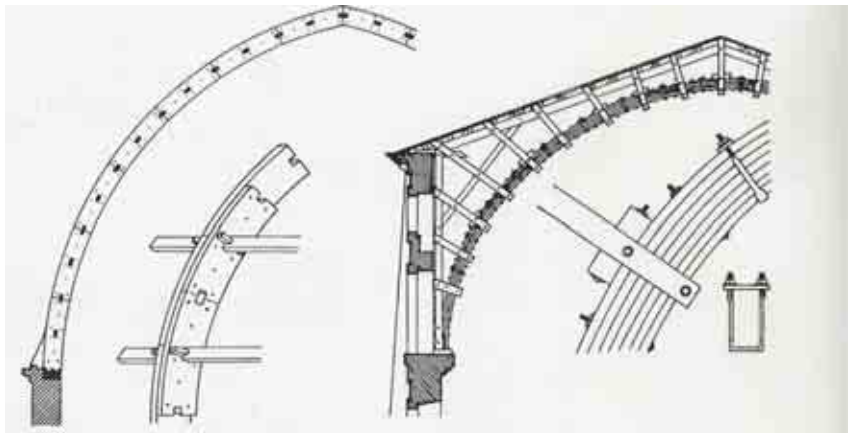


Abb. 18: parabelförmige Leitlinie eines Daches

Seinen ersten Bogen hat Gaudi in einer Scheune in Mataró gebaut. Kurze gerade Bretter die in 3 Lagen nebeneinander mit Schrauben und Nägeln verbunden sind bilden den parabelförmigen Bogen. Dieser wurde aber noch nicht richtig angewendet, da man in diesem Fall nicht von einer gleichmäßigen Belastung sprechen kann. Das aufliegende Dach greift nur im oberen Teil des Boges an und daher ist die Stützlinie nicht parabelförmig.

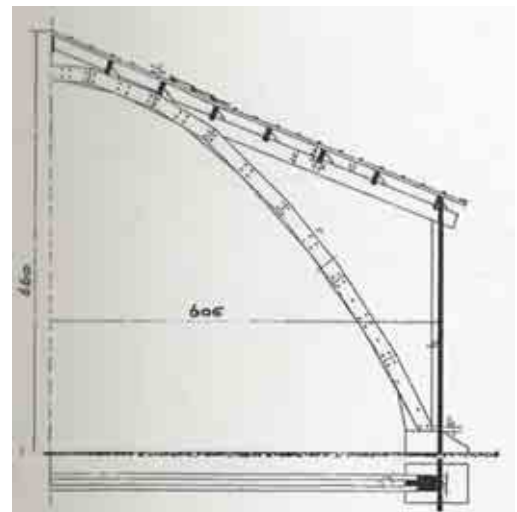


Abb. 19: Dach der Scheune in Mataró

Den ersten Ziegelsteinbogen verwendete Gaudi bei einer Brücke über den Teich der Casa Vicenc. Hier entstanden die Bögen durch Auskragen der Ziegelsteine. In dem Punkt wo die Auskragung der Ziegelsteine zu groß wurden, wurden die Steine in Längsrichtung hintereinander gemauert und der Bogen so in der Mitte geschlossen.

Meist verwendet Gaudi ähnliche Tragsysteme. Immer wieder kommt es zur selben Abfolge: Säulen bzw. Bogen als primäre Tragstruktur und das Rippennetz als sekundäre Tragstruktur, welches meist in Form der katalanischen Wölbtechnik ausgeführt ist.

Den Ziegelsteinbogen verwendet Gaudi immer wieder, manchmal verputzt oder sichtbar. Man findet in seinen Werken aber auch behauene Natursteinbrocken, Natursteinpfeiler unter anderem auch aus Basalt. Im Laufe der Zeit werden Gaudis Werke immer leichter und transparenter, was eine Folge seiner Entwicklungen ist. Er entwickelt Tragstruktur – der Bogen – und die Außenhaut.

In einigen seiner Werke ist die Struktur klar ablesbar und immer ähnlich. Bögen werden hintereinandergeschaltet, den Raum dazwischen überbrückt er mit gemauerten parabelförmigen Gewölben.

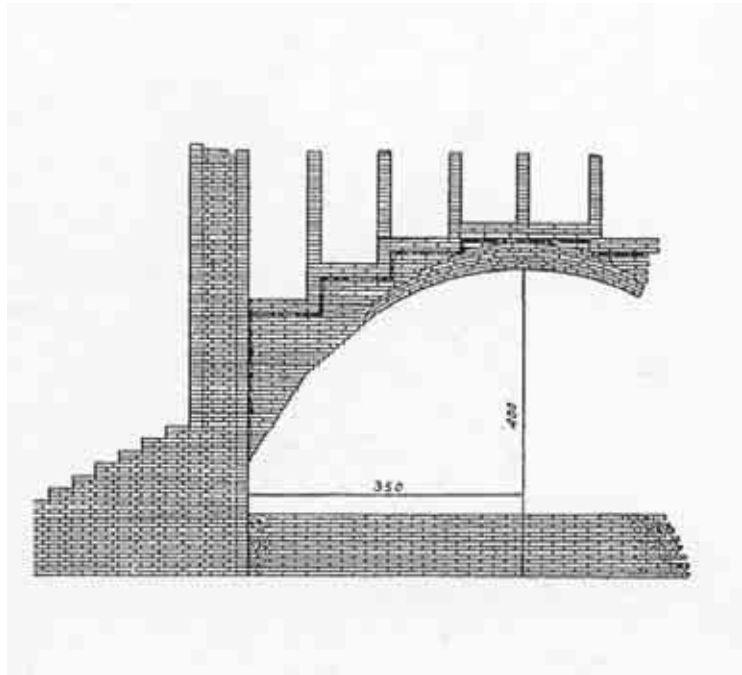


Abb.: 20: Brücke über dem Teich der Casa Vicenc

Die Bogenkonstruktionen werden mit der Zeit immer feingliedriger, weil Gaudi an Stellen, wo nach den statischen Berechnungen keine Kräfte auftraten, Material wegließ oder ein offenes Gitter entwarf.

In Gaudis Frühwerk findet man eine Reihe von Kuppeln zur Überbrückung von größeren Spannweiten. Manchmal sind diese sehr flach, er setzt aber auch steile parabelförmige Kuppeln ein. Diese, konstruktiv sehr einfachen Elemente werden später durch die doppelt gekrümmte Fläche abgelöst.

8.2 Colegio Teresiano

Im Colegio Teresiano (1888 - 1890) verwendet Gaudi kleine parabelähnliche Ziegelsteinbögen in den Gängen. Er kombiniert sie mit Blaken und stapelt sie auch übereinander in mehreren Geschossen, versetzt sie aber horizontal.

Die Bögen der Konstruktion sind modular geordnet. Zwischen den Säulen ist genug Platz für die Eingänge. Im Mittelteil wurden an Stelle der Bögen in Querrichtung profilierte Balken als Tragkonstruktion benutzt. Diese Konstruktion passt sich der des Treppenhauses besser an. Die Zone zwischen den beiden Gängen ist auch mit Biegeträgern überspannt, da hier die Spannweiten für die Bogenkonstruktion der Gänge zu groß sind.

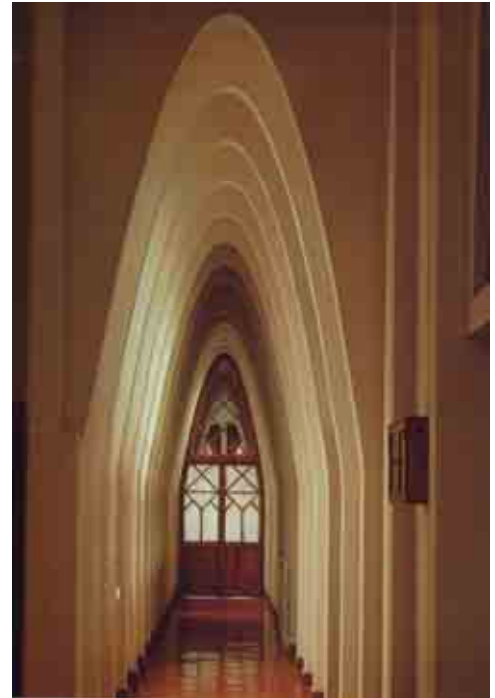


Abb. 21: Colegio Teresiano

8.3 Bellesguard (schöne Aussicht)

Es handelt sich hier um einen vom Aufbau her einfachen Baukörper, bei dem man von einer Stapelung von katalanischen Tragsystemen sprechen kann, wodurch ein Komplex aus faszinierenden Räumen entstand, mit einfachen Mitteln verwirklicht.

Unter dem hohen Dach befindet sich eines der ersten von Gaudis erstaunlichen Dachgewölben. In Bellesguard (1900 - 1902) wurden die Bögen nicht mehr als reine Parabeln ausgeführt und stehen nicht mehr auf einer Achse, sondern treffen sich lotrecht, zum Beispiel in den Gebäudeecken. Im Treppenhaus gibt es eine interessante Struktur aus gestapelten Pfeilern und Bögen.

„Auf Kapitellen setzen katalanische Gewölbe an, mit einem Gipsmörtel gefügte druckbeanspruchte Flächentragwerke aus ca. 5 cm dickem Mauerwerk. Die Krümmung dieser Gewölbeform ist für unsere Begriffe vergleichsweise gering.“⁷

Abb. 22: Bellesguard



⁷ Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003.

Das Prinzip der Überwölbung besteht aus seiner flachen gemauerten Decke, die auf dünnen gemauerten Bögen ruht. Der Ansatz der Bögen bildet eine Konsole von 5 cm Dicke, die ungefähr 8 Steine von jeweils 10 cm hoch sind. Danach beginnt der eigentliche Bogen. Darüber wird das Mauerwerk horizontal fortgesetzt. Die Bögen stehen ca. 50 cm auseinander. Dieser Abstand wird mit der katalanischen Mauermethode mit Ziegeln überbrückt.

8.4 Casa Milá · das Dach

Das großartigste an diesem Bauwerk ist sein Dach. Das Auf und Ab der Terrassen dieses Daches resultiert aus der unterschiedlichen Höhe der parabolischen Dachbinder, welche wiederum auf der Tatsache beruhte, dass die Dachbinder unterschiedliche Geschossbreiten überspannen mussten.

Die Technik des Ziegelleichtgewölbe ist in der Casa Milá geistreich abgewandelt; über parabelförmigen Bogenrippen aus hochkantgestellten Flachziegel spannt eine durchlaufende Ziegelschale, die gleichzeitig die Dachhaut bildet.

Bei der Dachkonstruktion der Casa Milá (1906 - 1910) variieren nicht nur die Spannweite und die Höhe der Bögen, auch die Bogenachse mäandert schleifenförmig, wodurch eine bewegte Dachlandschaft entsteht.

Es handelt sich um Scheiben mit trapezförmiger Außenkontur und einer bogenförmiger Aussparung entlang einer Kettenlinie. Diese ist für jeden Bogen proportional gleich. Dies bedeutet, dass die Scheiben mitsamt Bogenöffnung im gleichen Verhältnis größer wird wie die Stützweite.



Abb. 23: Casa Milá · Dachkonstruktion

Die Bögen sind 5 cm dick aus stehenden Ziegeln (= tabicada) Die Schübe der Bögen werden von einem Ringbalken im Deckentragwerk des Dachbodens aufgenommen, welcher als Zugband die Aufgabe hat, die Spreizkräfte zu übernehmen. Der Abstand der Bögen zueinander ist klein genug, um die Zwischenräume mit einer flachen Ziegelschale zu überdecken.

8.5 Crypta des Palacio Güell

Die Krypta der Kirche für die Colonia Güell ist durch ihre Tragstruktur beinahe schon ein komplettes Gebäude.

Hier sind die Pfeiler schräg angeordnet und folgen der Richtung der Druckkräfte, die das Hängemodell vorgab. Die Bögen der Vorhalle und der Krypta sind genau dort geknickt, wo Punktlasten auftreten.

Das Konstruktionsmodell, das Gaudi schuf, damit die Handwerker seine Ideen verstehen konnten ist faszinierend. Es war ein maßstabsgetreues Modell in Form eines Diagramms der Kräftelinien aus feinen Drahtseilen. Es wurden nicht-elastische, an beiden Enden befestigte Drahtseile in der gleichen Anzahl, wie Wölbungen und Verstärkungsrippen an dem Bau vorgesehen waren, aufgehängt und verknüpft. An entsprechenden Punkten wurden Leinensäckchen mit Bleikugeln an die Seile gehängt, die mit der Last übereinstimmten, durch die die Wölbung oder Rippe an dem betreffenden Punkt beansprucht werden sollte. Die Gewichte simulieren daher Angriffsort und Größe der geschätzten Belastung, vor allem des Eigengewichtes. Die Seilkurve wurde dadurch in eine vieleckige Form verzogen, deren Seiten die Neigung zeigten, die die Wölbungen, Rippen und Pfeiler bekommen mussten, um den Druck der betreffenden Last standhalten zu können. Dieses Modell um 180° gedreht zeigt die Konstruktion die dem Bauwerk entspricht. Im Modell wird die Tragstruktur durch zugbeanspruchte Fäden dargestellt, in der steinernen umgedrehten Krypta treten daher nur Druckkräfte auf. Die Windbelastung, die bei hohen Gebäuden großen horizontalen Druck auf die Struktur ausübt, wird in diesem Modell außer Acht gelassen.



Abb. 24: Hängemodell

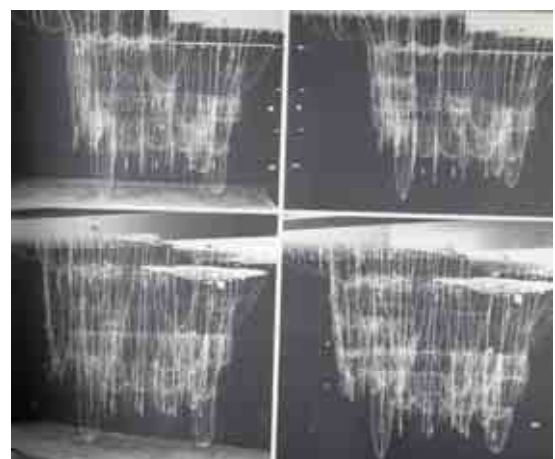


Abb. 25: Hängemodell

8.6 Technik

Das wesentliche Material, woraus der Bau entstehen sollte, war Backstein. Es handelte sich um Backsteine in drei Ausführungen. Ein Ziegel (29 * 14 * 5 cm) wurde für das Mauerwerk der Außenwände, Bögen und einen Teil der Stützen verwendet. Ein kleinerer Ziegel wurde für die Rippen gewählt. Ein Flachziegel von hoher Qualität wurde, vermauert mit gipshaltigem Mörtel, als Basismaterial gewählt. Der spezielle schnelltrocknende Mörtel ermöglicht das Mauern der Decken ohne Gerüste.

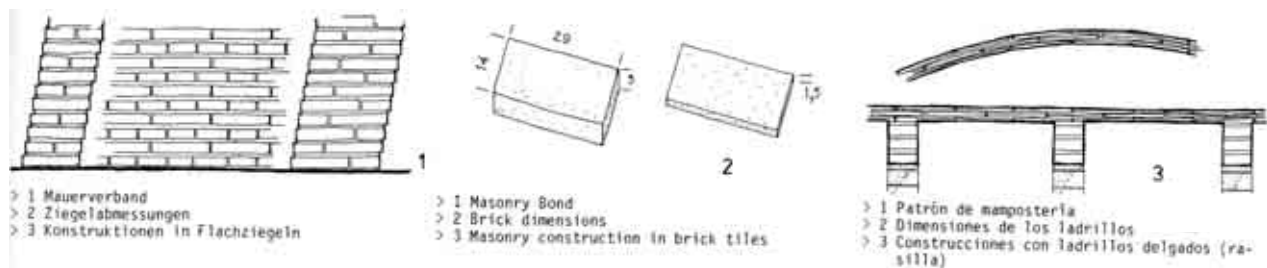


Abb. 26: Mauertechnik der Krypta

Der Backstein mit seiner typisch länglich-rechteckigen Form ist an sich ungeeignet für die Ausführung der in schiefen Winkeln zueinanderstehenden Formen. Ein zusätzliches Problem ist, dass in den Bauteilen das Mauerwerk möglichst so geschichtet sein muss, dass der Kraftfluss im Material etwa senkrecht auf die durchgehenden Fugenschichten trifft. Damit ist die Anzahl der möglichen Formen der Backsteinkonstruktion erheblich eingeschränkt.

Flächen mit größeren Krümmungsradien können unter Verwendung des Spielraums in den Fugen gemauert werden, der kleine Winkelverschiebungen zwischen den Backsteinen zulässt. Auch bei gleich starken Fugen können gekrümmte Flächen entstehen, wenn Steinschichten übereinander schrittweise gedreht werden. So entstehen die hyperbolisch-paraboloiden Flächen, die an verschiedenen Stellen in der Außenwand des Untergeschosses vorkommen.

Kompliziert wird es, wenn die Steine nicht nur in der Fläche, sondern auch räumlich zueinander gedreht werden. Die Handhabung dieser Komplexität ist nur auf Grund von profundem Wissen der Geometrie möglich.

Die lange Bauzeit des ausgeführten Gebäudeteils, während der nur wenige Mauern unter ständiger Betreuung der Architekten arbeiteten, lässt vermuten, wie schwierig die Ausführung war. Als Gaudi 1911 einige Monate erkrankte, bedeutet das die Einstellung der Arbeit, bis er wieder gesund war. Dass trotz der Einschränkungen Backstein für die Gebäudekonstruktion verwendet wurde, muss darauf zurückgeführt werden, dass es kaum Alternativen für die Ausführung der Hängemodellform gab.

Berühmt sind die Gewölbe der Portikus, das heißt des Terrassenbaus mit Treppenaufgang, der dem Bau vorgelagert ist. Ihre Wölbflächen sind aus hyperbolischen Paraboloiden gebildet.

Die tragende Konstruktion der Portikus besteht aus einem System von gemauerten polygonalen Bögen. Die dreieckigen Felder zwischen den Bögen sind mit HP-Flächen aus Flachziegeln ausgefüllt. Jeweils zwei Ränder dieser Flächen schließen geradlinig an zwei Bögen an, der dritte Rand ist mit konvexer und konkaver Krümmung an den dritten Bogen angeschlossen.

Die relativ dünnen HP-Flächen aus Flachziegel tragen eine Schüttung, der die Terrassenflächen und Treppenstufen aufliegen. An den Unterseiten sind die Wölbflächen mit Kachelstücken verziert, die in die Putzflächen gedrückt sind. Diese Dekoration bildet reizvolle, regelmäßige Muster, in deren Mitte jeweils ein Kreuz aus den beiden Erzeugenden gebildet ist: ein schönes Beispiel einer Einheit von Konstruktion und Symbol.

Die Gründe für die Anwendung der HP-Form im Untergeschoss sind vielfältig. Bei den Außenwänden war es vor allem die Logik einer praktikablen Umsetzung der vom Hängemodell vorgegebenen Wandform, die zur Regelfläche führte. Die Gewölbe der Portikus ergeben mit ihrer doppelten gegensinnigen Krümmung eine steife Konstruktion und fügen sich leicht in die schiefen Randbedingungen der Bögen. Die HP-Form aus Putz runden die polygonalen Bögen aus und erfüllen damit den dekorativen Zweck. Mit den Fensterlaibungen der Krypta schließt die Reihe der Beispiele der HP-Formen im gebauten Untergeschoss.

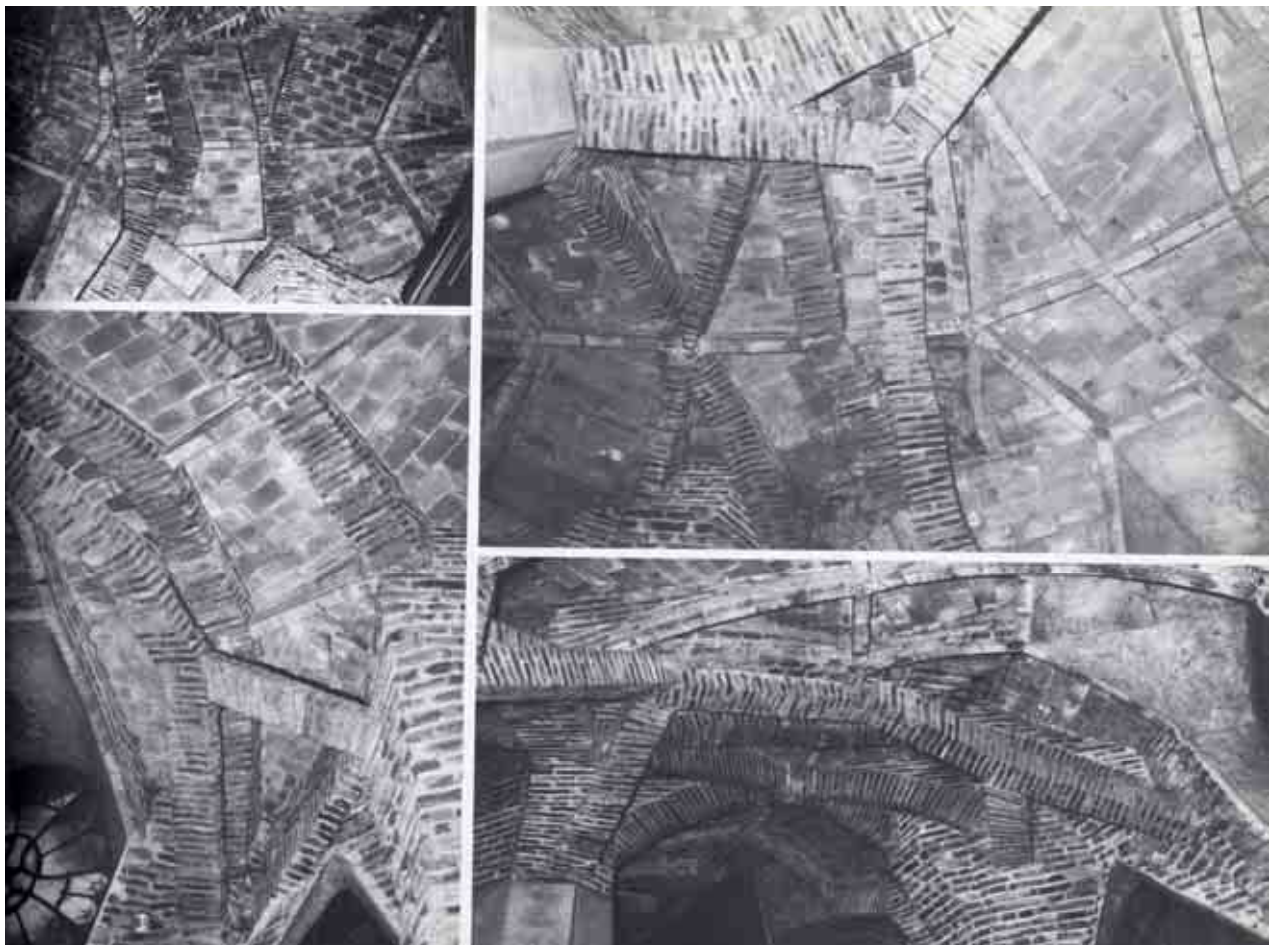


Abb. 27: Ziegelgewölbe der Krypta

8.7 Schule Sagrada Familia

Die Intensität mit der Gaudi sich mit Regelflächen beschäftigt war enorm. Alle Oberflächen sind fast vollständig aus Regelflächen gebildet. So auch bei der kleinen Schule neben der Sagrada Familia. Die gewellte Dachform wird durch Balken gebildet die auf einem geraden Längsbalken in der Gebäudemitte aufliegen. Die Dachfläche selbst besteht aus ein paar Schichten von Flachziegeln in katalanischer Mauerung.



Abb. 28: Dachdraufsicht

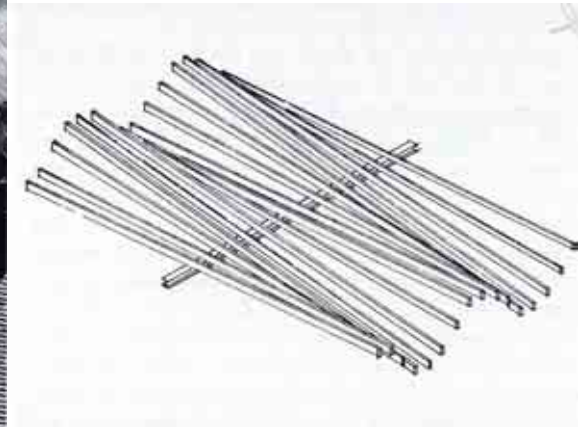


Abb. 29: Konstruktionsprinzip der Schule

Gaudi vereint die beiden unterschiedlichen Begriffe des katalanischen Gewölbes zu einem. Er wendet die Wölbtechnik mit Flachziegel und diagonal versetzten Ziegelreihen konsequent an und er verwendet durchgehend hyperbolische Fläche, die so genannten Catalanschen Flächen.

9. Literaturangaben

Tomlow, Jos: Das Modell, ISBN 3-78282034-7, Karl Krämer Verlag, 1989.

Zerbst, Rainer: Antoni Gaudí, ISBN 3-8228-6930-9, Benedikt Taschen Verlag, 1985.

Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003.

Heinle, Erwin; Schlaich, Jörg: Kuppeln, ISBN 3-421-03062-6, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1996.

Hart, Franz: Kunst und Technik der Wölbung, Verlag Georg D. W. Callwey München, 1956

Faber, Colin: Candela und seine Schalen, Georg D.W.Callwey Verlag, 1965

Ramm, Ekkehard; Schnuck, Eberhard: Heinz Isler Schalen, ISBN 3-7281-2792-2, vdf Hochschulverlag, 2002.

Arcus, Architektur und Wissenschaft: Zum Werk von Felix Candela, ISBN 3-481-00489-3, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1992.

Badr, Issam Eldin Abdou: Vom Gewölbe zum räumlichen Tragwerk, Promotionsarbeit, Akertes Erben AG, 1962.

Born, Joachim: Schalen-Faltwerke-Rippenkuppeln und Hängedächer, DK 960.024.4, Werner Verlag, 1962.

Collins, George: Antonio Gaudi, Otto Maier Verlag Ravensburg, 1962.

Bach, Klaus: Vladimir G. Suchov, Die Kunst der sparsamen Konstruktion, ISBN 3-421-02984-9, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1990.

<http://websee.de/Forschungsbericht.html>, websee.de

<http://www.flair-twl.de/download/hypar.pdf>

http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Hyperbolisches_Paraboloid.html

<http://www.lexikon-definition.de/Hyperbolisches-Paraboloid.html>

<http://www.artehistoria.com/frames.htm?http://www.artehistoria.com/tienda/banco/cuadros/18478.htm>

<http://de.travel.yahoo.com/t/wc/spanien/barcelona/attraction/basicadesantamaradelmar.html>

<http://www.tourspain.es/TourSpain/Arte%20y%20Cultura/Monumentos/I/CP/0/Iglesia%20de%20Santa%20Maria%20deI%20Mar?Language=DE>

<http://www.tourspain.es/TourSpain/Arte%20y%20Cultura/Monumentos//CP/0/Iglesia%20de%20Santa%20Maria%20del%20Mar?Language=DE>

<http://www.tu-harburg.de/b/kuehn/lec14.html>

<http://www.republika.pl/barcelona123/images/Zdjecia/Santa%20Maria%20del%20Mar.jpg>

[www.hs-zigr.de/bauwesen/bau/Tomlow/\(52\).doc](http://www.hs-zigr.de/bauwesen/bau/Tomlow/(52).doc)

http://hss.ulb.uni-bonn.de/ulb_bonn/diss_online/phil_fak/2003/kehrloesser_klaus/teil1.pdf

10. **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1 Heinle, Erwin; Schlaich, Jörg: Kuppeln, ISBN 3-421-03062-6, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart, 1996, S 207.

Abb. 2 <http://www.matha.rwth-aachen.de/lehre/geometrieposter/folie17.html>

Abb. 3 <http://www.h1arch.tuwien.ac.at--download> Bereich, Priebornig: 2004

Abb. 4 <http://www.mathematik.uni-kassel.de/~rascha/ellParaboloide.html>

Abb. 5 <http://www.mathematik.uni-kassel.de/~rascha/ellParaboloide.html>

Abb. 6 Arcus, Architektur und Wissenschaft: Zum Werk von Felix Candela, ISBN 3-481-00489-3, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1992, S 20

Abb. 7 Faber, Colin: Candela und seine Schalen, Georg D.W.Callwey Verlag, 1965, S 97.

Abb. 8 Faber, Colin: Candela und seine Schalen, Georg D.W.Callwey Verlag, 1965, S 147.

Abb. 9 Faber, Colin: Candela und seine Schalen, Georg D.W.Callwey Verlag, 1965, S 204

Abb. 10 Ramm, Ekkehard; Schnuck, Eberhard: Heinz Isler Schalen, ISBN 3-7281-2792-2, vdf Hochschulverlag, 2002, S 69.

Abb. 11 <http://www.tu-harburg.de/b/kuehn/lec14.html>

Abb. 12 <http://www.tu-harburg.de/b/kuehn/lec14.html>

Abb. 13 Bach, Klaus: Vladimir G. Suchov, Die Kunst der sparsamen Konstruktion, ISBN 3-421-02984-9, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart, 1990, S110.

- Abb. 14 Bach, Klaus: Vladimir G. Suchov, Die Kunst der sparsamen Konstruktion, ISBN 3-421-02984-9, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1990, S101.
- Abb. 15 <http://www.republika.pl/barcelona123/images/Zdjecia/Santa%20Maria%20del%20Mar.jpg>
- Abb. 16 <http://www.artehistoria.com/frames.htm?http://www.artehistoria.com/tienda/banco/cuadros/-18478.htm>
- Abb. 17 http://hss.ulb.uni-bonn.de/ulb_bonn/diss_online/phil_fak/2003/kehrloesser_klaus/teil1.pdf
- Abb. 18 Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003.
- Abb. 19 Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003.
- Abb. 20 Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003.
- Abb. 21 Zerbst, Rainer: Antoni Gaudí, ISBN 3-8228-6930-9, Benedikt Taschen Verlag, 1985, S90.
- Abb. 22 Moro, José Luis: Antoni Gaudí 1852-1926, ISBN 3-421-03457-5, Deutsche Verlags-Anstalt München, 2003, S130.
- Abb. 23 Fotos v. Verfasser.
- Abb. 24 Zerbst, Rainer: Antoni Gaudí, ISBN 3-8228-6930-9, Benedikt Taschen Verlag, 1985, S185.
- Abb. 25 Tomlow, Jos: Das Modell, ISBN 3-78282034-7, Karl Krämer Verlag, 1989, S83
- Abb. 26 Tomlow, Jos: Das Modell, ISBN 3-78282034-7, Karl Krämer Verlag, 1989, S144
- Abb. 27 Tomlow, Jos: Das Modell, ISBN 3-78282034-7, Karl Krämer Verlag, 1989, S149.
- Abb. 28 Bach, Klaus: Vladimir G. Suchov, Die Kunst der sparsamen Konstruktion, ISBN 3-421-02984-9, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1990, S114.
- Abb. 29 Bach, Klaus: Vladimir G. Suchov, Die Kunst der sparsamen Konstruktion, ISBN 3-421-02984-9, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1990, S114.