Zeitschrift: Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift

Herausgeber: Bauen + Wohnen

Band: 13 (1959)

Heft: 8: Betonbau = Construction en béton = Concrete construction

Artikel: Systematik der Schalenkonstruktion

Autor: Joedicke, Jürgen

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-330083

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Einfach gekrümmte Schalen
Surfaces courbes à une nappe
Single-curve surfaces

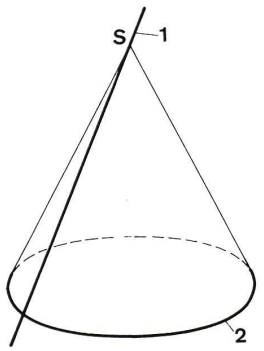
Abb. 1

Die Flächen, nach denen diese Schalen geformt sind, sind abwickelbar; sie lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen:

Les surfaces selon lesquelles ces nappes sont façonnées, sont développables; elles peuvent être divisées en deux groupes:

The surfaces according to which these shells are formed can be projected; they can be divided into two groups:

Kegel
Cône
Cone



Kegel entstehen, wenn eine Gerade (Mantellinie) so bewegt wird, daß sie stets durch einen festen Punkt S geht und eine Kurve beliebiger Form (Leitkurve) schneidet.

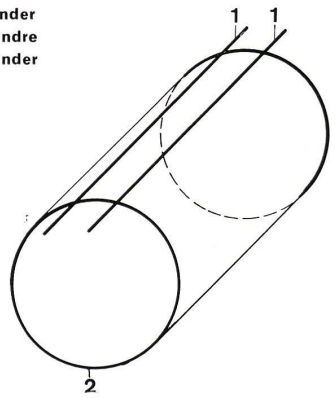
Les cônes sont engendrés par une droite (génératrice) qui se déplace en passant par un point fixe S et en suivant une courbe quelconque (directrice).

The cones are generated by a straight line (generatrix) so moving that it always passes through a fixed point S and describes a curve of any desired form (directrix).

Beispiel: / Exemple: / Example:

Ist die Leitkurve ein Kreis, so entsteht der Kreiskegel.
Si la directrice est un cercle, le cône est droit.
If the directrix is a circle, the cone is circular.

Zylinder
Cylindre
Cylinder



Zylinder entstehen durch Führung einer Geraden (Mantellinie) auf einer Leitkurve, wobei die Mantellinien untereinander parallel sind.

Les cylindres sont engendrés par une droite (génératrice) suivant une directrice, les génératrices étant parallèles entre elles.

Cylinders are generated by a straight line (generatrix) following a directrix, the generatrices being parallel to one another.

Beispiel: / Exemple: / Example:

Ist die Leitkurve ein Kreis, so entsteht ein Kreiszylinder.
Si la directrice est un cercle, le cylindre est dit de révolution.
If the directrix is a circle, a "circular" cylinder is generated.

Eine häufige Anwendung ist die Tonnenschale.
Une application fréquente est le coffrage en forme de tonnelle.
A frequent application is framing in barrel-vault form.

1 Mantellinie / Génératrice / Generatrix
2 Leitkurve / Directrice / Directrix

Zweifach gekrümmte Schalen mit gleichgerichteten Hauptkrümmungen (Kuppelschale).
Surfaces courbes à deux nappes
Double curve surfaces

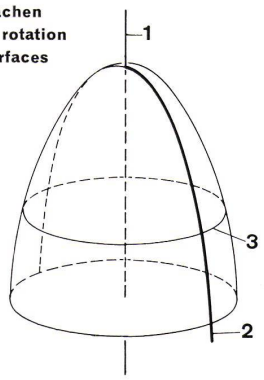
Abb. 2

Die Flächen, nach denen diese Schalen gekrümmt sind, sind nicht abwickelbar. Es gibt unendlich viele Flächen dieser Art. Im Bauwesen wurden bisher verwendet:

Les surfaces selon lesquelles ces nappes sont façonnées ne sont pas développables. Il existe un nombre illimité de surfaces de ce genre. Furent utilisées jusqu'à présent dans le bâtiment:

The surfaces according to which these shells are formed cannot be projected. There are an unlimited number of surfaces of this type. There have been utilized up to the present time in construction:

Rotationsflächen
Surfaces de rotation
Rotating surfaces



Diese Flächen entstehen durch Drehung einer ebenen Kurve (Meridian) um eine in einer Ebene liegende Gerade (Drehachse), wobei der Meridian zur Drehachse konkav ist.

Ces surfaces sont engendrées par une courbe plane (méridien) tournant autour d'une droite (axe de rotation), le méridien étant concave par rapport à l'axe de rotation.

These surfaces are generated by rotation of a plane curve (meridian) about a straight line lying in a plane (axis of rotation), the meridian being concave in relation to the axis of rotation.

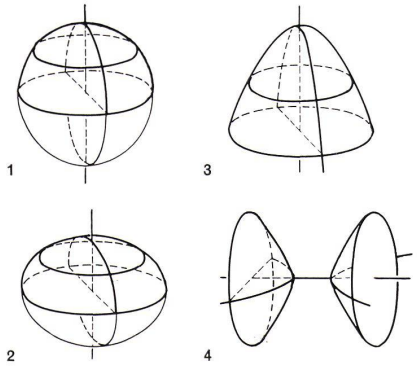
Beispiele für Rotationsflächen: / Exemples: / Examples:

1
Kugel (Meridian: Kreis)
Sphère (méridien: cercle)
Sphere (meridian: circle)

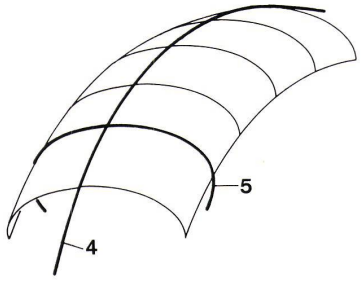
2
Ellipsoid (Meridian: Ellipse)
Ellipsoïde (méridien: ellipse)
Ellipsoid (meridian: ellipse)

3
Rotationsparaboloid (Meridian: Parabel)
Paraboloïde de rotation (méridien: parabole)
Rotating Paraboloid (meridian: parabola)

4
Zweischaliges Hyperboloid (Meridain: Hyperbel)
Hyperboloïde à deux nappes (méridien: hyperbole)
Double-surface hyperboloid (meridian: hyperbola)



Translationsflächen
Surfaces de translation
Translation surfaces



Diese Flächen entstehen unter Führung einer Kurve (Erzeugende) auf einer anderen Kurve (Leitkurve), wobei die Erzeugenden mit sich parallel bleiben. Erzeugende und Leitkurve haben gleichgerichtete Krümmungen.

Ces surfaces sont engendrées par une courbe (génératrice) suivant une autre courbe (directrice), les génératrices restant parallèles entre elles. Les génératrice et directrice sont courbées dans le même sens.

These surface are generated by a curve (generatrix) following another curve (directrix), the generatrices remaining parallel with one another. Generatrix and directrix are curved in the same direction.

1 Drehachse / Axe de rotation / Axis of rotation
2 Meridian / Méridien / Meridian
3 Breitenkreis / Parallèle / Parallel
4 Leitkurve / Directrice / Directrix
5 Erzeugende / Génératrice / Generatrix

Jürgen Joedicke

Systematik der Schalenkonstruktionen

Zweifach gekrümmte Schalen mit gegensinnigen Hauptkrümmungen (Sattelschalen)

Surfaces à deux nappes à courbes principales dans un sens opposé (coquilles en bâtière)

Double-curve surfaces with main curves in opposite directions (saddle-surfaces)

Abb. 3

Die Flächen, nach denen diese Schalen geformt sind, sind nicht abwickelbar. Es gibt unendlich viele Flächen dieser Art. Im Bauwesen wurden bisher verwendet:

Les surfaces selon lesquelles ces nappes sont façonnées ne sont pas développables. Il existe un nombre illimité de surfaces de ce genre. Furent utilisées jusqu'à présent dans le bâtiment:

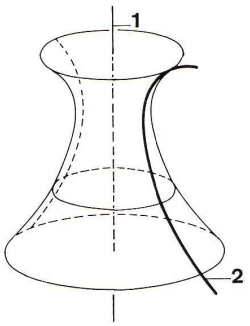
The surfaces according to which these shells are formed cannot be projected. There are an unlimited number of this type. In construction there have been used to now the following:

Zeichnungen: Archiv für Moderne Architektur an der Technischen Hochschule Stuttgart (Dr.-Ing. J. Joedicke).

Archives d'architecture moderne de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart.

Modern Architecture archives of the Institute of Technology, Stuttgart.

Rotationsfläche
Surfaces de rotation
Rotating surfaces



Diese Flächen entstehen durch Drehungen einer ebenen Kurve (Meridian) um eine in ihrer Ebene liegende Gerade, wobei der Meridian zur Drehachse konvex ist.

Ces surfaces sont engendrées par la rotation d'une courbe plane (méridien), le méridien étant convexe par rapport à l'axe de rotation.

These surfaces are generated by rotations of a plane curve (meridian), the meridian being convex in relation to the axis of rotation.

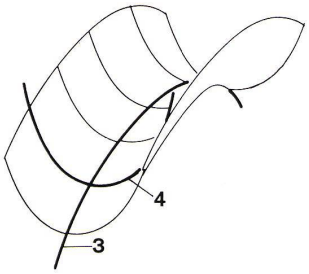
Beispiel: / Exemple: / Example:

Die Drehung einer Hyperbel um ihre stofffreie Achse ergibt ein einschaliges Hyperboloid.

La rotation d'une hyperbole autour de son axe non transverse engendre un hyperboloïde à une nappe.

The rotation of a hyperbola about its non-transverse axis generates a single-surface paraboloid.

Translationsflächen
Surfaces de translation
Translation surfaces



Diese Flächen entstehen durch Führung einer Kurve (Erzeugende) auf einer andern Kurve (Leitkurve), wobei die Erzeugenden immer mit sich selbst parallel bleiben. Erzeugende und Leitkurve sind entgegengesetzt gekrümmt.

Ces surfaces sont engendrées par une courbe (génératrice) suivant une autre courbe (directrice), les génératrices restant parallèles entre elles. Les génératrice et directrice sont courbées dans un sens opposé.

These surfaces are generated by a curve (generatrix) moving on another curve (directrix), the generatrices always being parallel to one another. Generatrix and directrix are curved in opposite directions.

Beispiel: / Exemple: / Example:

Sind Erzeugende und Leitkurven Parabeln, so entsteht das hyperbolische Paraboloid.

Si les génératrice et directrice sont des paraboles, on obtient un paraboloïde hyperbolique.

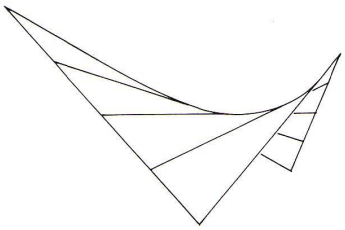
If generatrix and directrix are parabolas, a hyperbolic paraboloid is generated.

Regelflächen
Surfaces réglées
Rule surfaces

Regelflächen entstehen durch Führung von Geraden (Erzeugende) auf zwei Leitlinien.

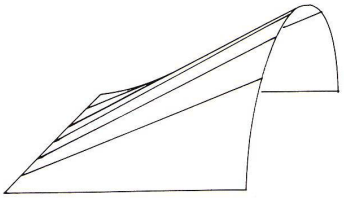
Les surfaces réglées sont engendrées par des droites (génératrices) suivant deux directrices.

Rule surfaces are generated by straight lines (generatrix) moving on two directrices.



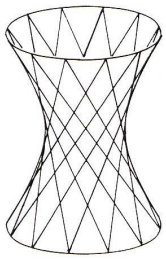
Zwei windschiefe Geraden.
Deux droites gauches.
Two oblique straight lines.

Beispiel: / Exemple: / Example:
Hyperbolisches Paraboloid.
Paraboloïde hyperbolique.
Hyperbolic paraboloid.



Kurve und Gerade.
Courbe et droite.
Curve and straight line.

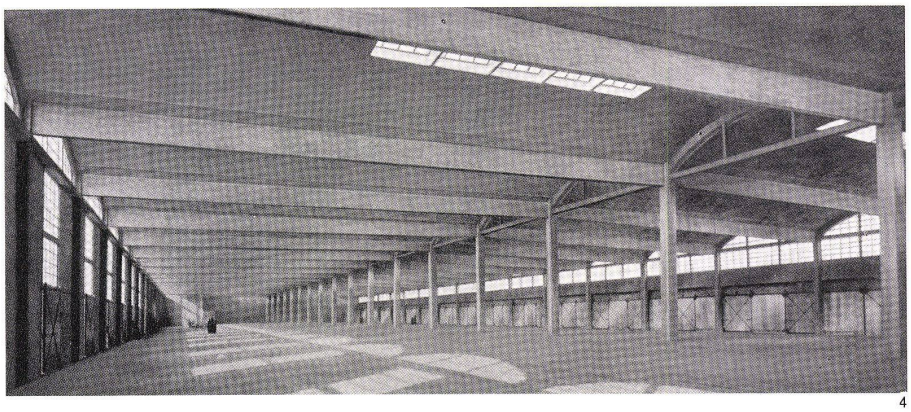
Beispiel: / Exemple: / Example:
Konoid.
Cônoïde.
Conoid.



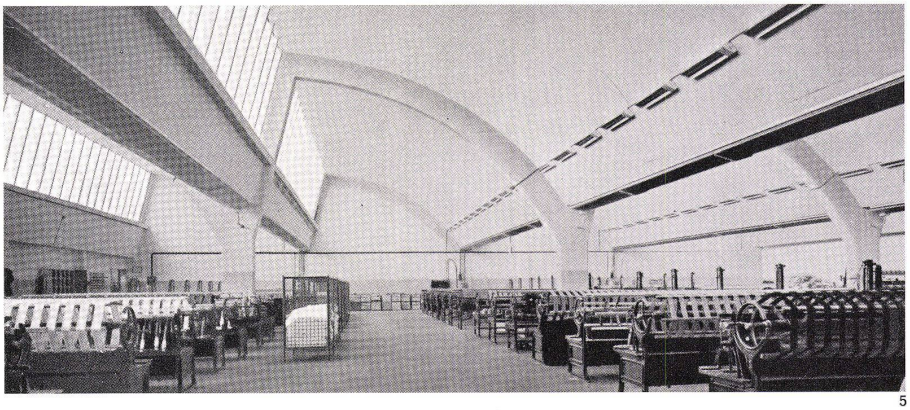
Zwei Kurven.
Deux courbes.
Two curves.

Beispiel: / Exemple: / Example:
Einschaliges Hyperboloid.
Hyperboloïde à une nappe.
Single-surface hyperboloid.

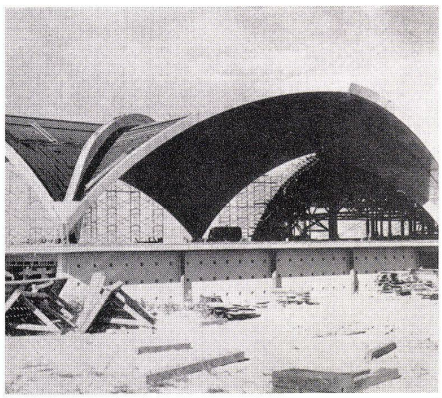
1 Drehachse / Axe de rotation / Axis of rotation
2 Meridian / Méridien / Meridian
3 Leitkurve / Directrice / Directrix
4 Erzeugende / Génératrice / Generatrix



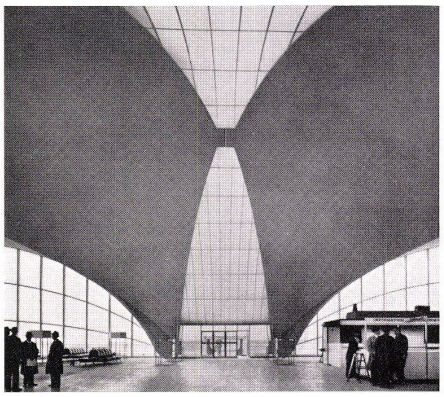
4



5



6



7

4
Zylinderschalen. Kaischuppen 59 in Hamburg.

Coquille en tonnelle. Hangars 59 du port de Hambourg.

Barrel-vaults. Dock sheds 59 in the port of Hamburg.

5
Schalenshed, aus Zylinderschalen gebildet. Schoellersche Kammgarnspinnerei, Eitorf. Architekt T. H. Hagen, Siegburg.

Shed à coquilles. Filature de laine peignée Schoeller à Eitorf.

Shell shed. Schoeller Worsted Spinning Works, Eitorf.

6
Durchdringung von zwei Zylinderschalen in der Art eines Kreuzgewölbes. Flughafen St. Louis, Empfangsgebäude. Architekten G. F. Hellmuth, J. W. Leinweber und M. Yamasaki. (Entnommen aus L'architettura cronace e storia, 1957).

Intersection de deux coquilles cylindriques dans le genre d'une voûte croisée. Aérogare St. Louis. Bâtiment de réception.

Intersection of two cylindrical shells in the manner of a cross-arched vault. St. Louis Airport, Reception Building.

7
Innenansicht des Empfangsgebäudes auf dem Flughafen St. Louis. (Entnommen aus J. Joedicke, Geschichte der modernen Architektur.)

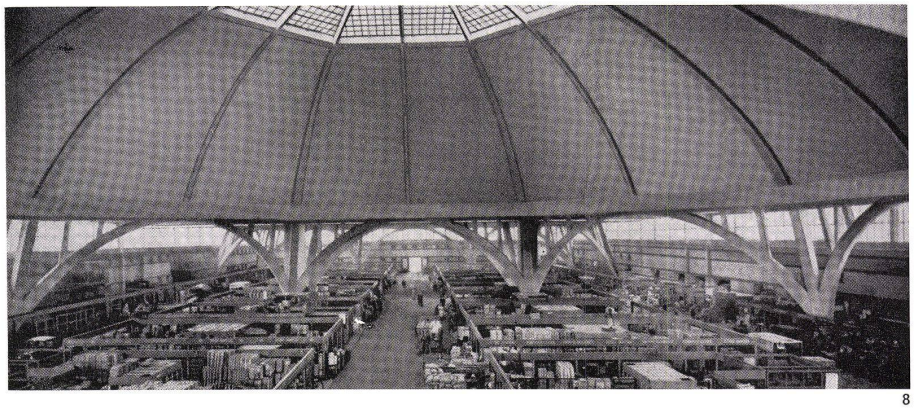
Vue intérieure du bâtiment de réception de l'aérogare St. Louis.

Interior view of the Reception Building of the St. Louis Airport.

8
Durchdringung von Zylinderschalen in der Art eines Klostergewölbes. Großmarkthalle Leipzig, Architekt H. Ritter.

Intersection de coquilles cylindriques dans le genre d'une voûte surhaussée. Halles du marché de gros à Leipzig.

Intersection of cylindrical shells in the manner of a cross-arched vault. Wholesale market, Leipzig.



8

Die unendliche Vielfalt der Flächen, nach denen Schalen gebildet werden können, verwirrt und erschwert die Anwendung dieser Konstruktionsformen. In diesem Artikel wird der Versuch unternommen, unter Verzicht auf mathematische Formeln und Begriffe eine leichtverständliche Ordnung aufzustellen, welche dem Architekten die Orientierung über dieses Gebiet erleichtern soll.

Jedes Ordnungsprinzip ist ein Hilfsmittel zur Unterstützung der Arbeit; es ist deshalb immer auf einen bestimmten Zweck zugeschnitten. Der Statiker zum Beispiel wird das Gebiet der Schalenbauweise so aufgliedern, daß rechnerisch in ähnlicher Weise zu erfassende Konstruktionsformen in Gruppen vereint werden: man findet deshalb in Büchern über Schalenstatik eine Einteilung in Zylinderschalen, Rotationsschalen und Schalen beliebiger Form. In der analytischen Geometrie spricht man ganz allgemein von Flächen zweiter Ordnung. Für den Architekten dagegen wird eine Gliederung sinnvoll sein, die nicht von abstrakten Begriffen ausgeht, sondern von der anschaulichen Form, und die dann die Entstehung dieser Form beschreibt, sich aber auch dabei an das Anschauliche hält. Derjenige, der mehr über die mathematischen Zusammenhänge zu erfahren wünscht, findet in jedem Lehrbuch über analytische Geometrie die entsprechenden Hinweise.

Wenn man die angestellten Überlegungen akzeptiert, lassen sich nach der Art ihrer Oberflächenkrümmung sämtliche möglichen Schalenformen in zwei große Gruppen einteilen: die erste Gruppe umfaßt alle Schalen, welche nur in einer Richtung gekrümmt sind; die zweite alle diejenigen, die zusätzlich zur Krümmung in einer Richtung eine zweite aufweisen (Abb. 1-3). Die zweifach gekrümmten Schalen können dabei in Form einer Kuppel (gleichgerichtete Hauptkrümmungen) oder in Form eines Sattels (gegensinnige Hauptkrümmungen) geformt sein.

Der Unterschied zwischen einer einfach gekrümmten und einer doppelt gekrümmten Fläche läßt sich anschaulich verdeutlichen, wenn man die Begriffe der abwickelbaren und der nicht abwickelbaren (windschiefen) Fläche einführt. Die einen Kreiszylinder umhüllende Fläche kann in einer Ebene abgewickelt werden, während die Abwicklung der Fläche eines hyperbolischen Paraboloids nicht möglich ist. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen einfach und doppelt gekrümmten Flächen ist in ihrem unterschiedlichen statischen Verhalten zu sehen. Bei der Idealform einer Schale werden alle äußeren Kräfte (Eigengewicht und Nutzlast) unter Vermeidung von Biegemomenten lediglich durch Schub- und Längskräfte im Inneren der Konstruktion aufgenommen. Nur deshalb ist es möglich, mit membranartigen Konstruktionsstärken größte Spannweiten zu überbrücken. Dieser ideale Spannungszustand kann erreicht werden, wenn die Schale doppelt gekrümmt ist und die Krümmung selbst nicht zu flach ist. Bei einfach gekrümmten Schalen (zum Beispiel bei einer Tonnenschale) tritt ein solcher von Biegemomenten freier Spannungszustand nur ein, wenn die Endtangente am Kämpfer vertikal verläuft (zum Beispiel Halbkreistonne) und wenn ein gewichtloses Randglied entlang der Kämpferzone angeordnet wird. Da dieses Randglied aber erhebliche Zugkräfte aufnehmen muß, kann es nicht gewichtlos sein. Das vorhandene Gewicht bewirkt eine Randstörung in der Schale und erzeugt Biegemomente; der Idealfall eines von Biegemomenten freien Spannungszustandes kann sich nicht einstellen. Die

Tonnenschale als einfach gekrümmte Fläche ist zwar als Schale zu bezeichnen und sollte auch nach den Gesetzen der Schalentheorie berechnet werden, nähert sich aber in ihrem statischen Verhalten dem eines normalen Balkens.

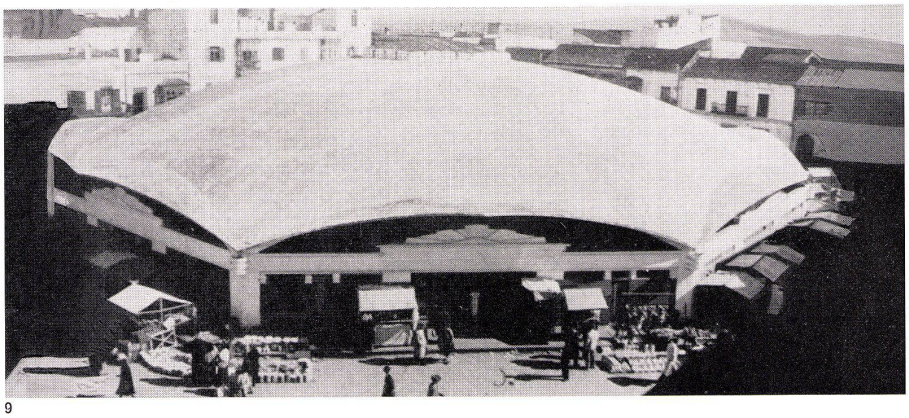
Einfach gekrümmte Schalen (Abb. 1)

Die im Bauen am häufigsten verwendete Form ist der Zylinder mit kreisförmiger oder elliptischer Leitkurve. Nach der allgemeinen Definition entsteht ein Zylinder durch Führung einer Geraden (Mantellinie) auf einer Leitkurve, wobei alle Mantellinien untereinander parallel sein müssen. Die Leitkurve kann jede beliebige Form haben. Im allgemeinen verbindet sich mit dem Zylinder die Vorstellung des Kreiszylinders, der aber nur eine der möglichen Formen darstellt. Die Zylinderfläche kann auch als Sonderfall einer Kegelfläche aufgefaßt werden, deren Spitze im Unendlichen liegt. Ein Kegel entsteht, wenn eine erzeugende Gerade so geführt wird, daß sie stets durch einen festen Punkt geht und eine Kurve beliebiger Form schneidet.
Die nach einer Zylinderfläche geformte Schale wurde zuerst in den zwanziger Jahren von Dischinger und Bauersfeld entwickelt, um den Schalenkonstruktionen im Industriebau ein weites Anwendungsgebiet zu verschaffen (Abb. 4). Aus der Zylinderschale entstand auch der Schalenshed, der die stützenfreie Überspannung größerer Räume und infolge seiner Krümmung eine gleichmäßige Ausleuchtung der Halle gestattet (Abb. 5). Durchdringungen von Zylinderschalen ermöglichen die Überbrückung kreuzförmiger, quadratischer und polygonaler Räume. Nach der gewünschten Raumwirkung kann die Durchdringung in der Art eines Kreuzgewölbes (Abb. 6 und 7) oder in der Art eines Klostergewölbes (Abb. 8) erfolgen.

Zweifach gekrümmte Schalen

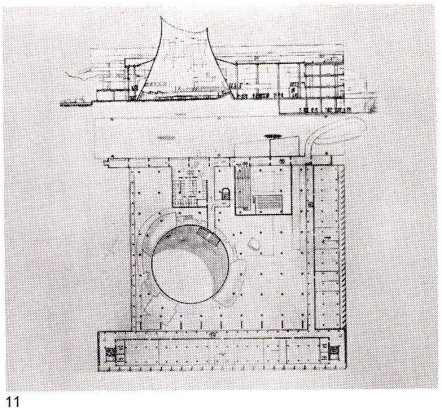
Gleichgerichtete Hauptkrümmungen (Kuppelschalen) Abb. 2

Die im Bauen verwendeten Formen können nach ihrer Entstehung in Rotationsflächen und Translationsflächen gegliedert werden. Eine Rotationsfläche entsteht durch Drehung einer ebenen Kurve um eine in ihrer Ebene liegende Drehachse, wobei die erzeugende Kurve, soll eine Kuppelfläche mit gleichgerichteten Hauptkrümmungen entstehen, konkav zur Drehachse sein muß. Die erzeugende Kurve wird als Meridian bezeichnet, die von den einzelnen Punkten des Meridians beschriebenen Kreise nennt man Breitenkreise.
Die bekannteste Rotationsfläche dieser Art ist die Kugel, wobei der Meridian Kreisform hat. Ist der Meridian eine Ellipse, so entsteht das Rotationsellipsoid, ist der Meridian eine Parabel, entsteht das Rotationsparaboloid (Abb. 2 rechts). Die Drehung einer Hyperbel kann in zweifacher Art erfolgen: die Hyperbel kann einmal um ihre reelle Achse (Stoffachse) rotieren: es entsteht das zweischalige Rotationshyperboloid — oder sie kann sich um die imaginäre Achse drehen: es entsteht das einschalige Rotationshyperboloid. Letzteres ist aber bereits eine Sattelfläche und gehört deshalb zur Gruppe der zweifach gekrümmten Schalen mit gegensinnigen Hauptkrümmungen (Abb. 3 oben). Bei allen Rotationsflächen ergeben Schnitte, die senkrecht zur Drehachse geführt werden, Kreise, während Schnitte parallel zur Drehachse Kurven von der Art der Erzeugenden ergeben.
Von jeder der hier erwähnten Rotationsflächen, die nach dem Sprachgebrauch der

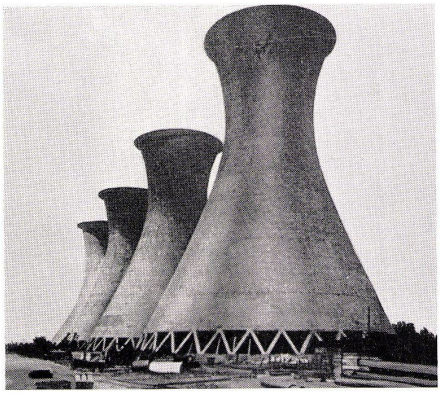


9

10



11



12

9
Rotationsschale. Markthalle in Algeciras. Ingenieur Eduardo Torroja.
Coquille de coupole. Halles de marché à Algeciras.
Dome shell. Market hall in Algeciras.

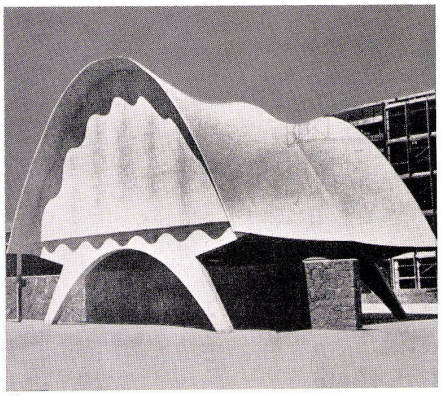
10
Translationsschale. Gummifabrik in Brynmawr. Architekten Architects' Co Partnership.
Coquille de translation. Fabrique de caoutchouc à Brynmawr.
Translation shell. Rubber factory in Brynmawr.

11
Einschaliges Hyperboloid. Parlamentsgebäude in Chandigarh. Architekt Le Corbusier. (Entnommen aus Le Corbusier, Oeuvres complètes 1952—1957.)
Hyperboloïde à une nappe. Bâtiment du Parlement à Chandigarh.
Single-surface hyperboloid. Parliament Building in Chandigarh.

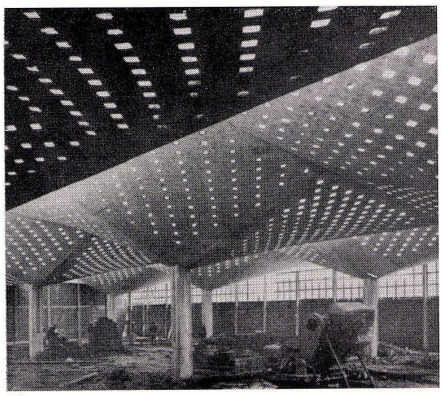
12
Einschaliges Hyperboloid. Kühlturm.
Hyperboloïde à une nappe. Tour de réfrigération en acier.
Single-surface hyperboloid. Steel refrigeration tower.

13
Hyperbolisches Paraboloid. Institut für kosmische Strahlenforschung in Mexiko-City. Ingenieur Felix Candela.
Paraboloïde hyperbolique. Institut d'étude des rayons cosmiques à Mexico-City.
Hyperbolic paraboloid. Institute for the Study of Cosmic Radiation in Mexico-City.

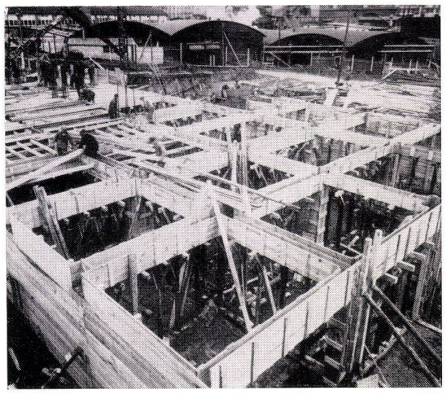
14
Hyperbolisches Paraboloid. Lagerhaus in Mexico-City. Ingenieur Felix Candela.
Entrepôt à Mexico-City.
Warehouse in Mexico-City.



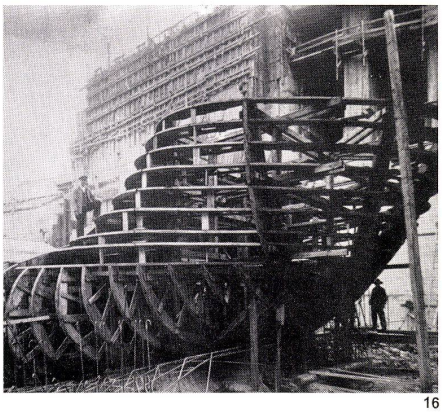
13



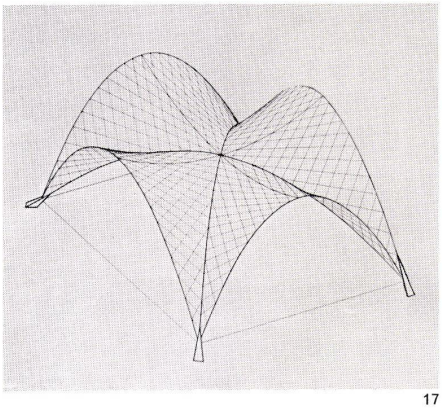
14



15



16



17

analytischen Geometrie Rotationsflächen zweiter Ordnung sind, kann durch affine Transformation eine allgemeinere Fläche zweiter Ordnung hergestellt werden. Die Breitenkreise der Rotationsflächen gehen dabei in ähnliche Ellipsen über, wobei immer eine Achse jeder Ellipse gleich dem Durchmesser des entsprechenden Breitenkreises ist. Aus dem Rotationsellipsoid entsteht die allgemeinere Form des Ellipsoids, aus dem Rotationsparaboloid das allgemeinere (elliptische) Paraboloid usw.

Als Beispiel für eine Kuppelschale, die nach einer Rotationsfläche mit dem Kreis als Meridian gebildet ist, kann die von Eduardo Torroja konstruierte Markthalle in Algeciras genannt werden (Abb. 9).

Neben den Rotationsflächen haben die Translationsflächen Bedeutung im Bauen erlangt. Eine Translationsfläche entsteht durch Führung einer erzeugenden Kurve auf einer Leitkurve (Abb. 2 unten). Die Ebenen der erzeugenden Kurve müssen in ihren verschiedenen Stellungen immer parallel zueinander bleiben. Erzeugende wie Leitkurve haben gleichgerichtete Krümmungen. Die Schalenkonstruktionen der Gummifabrik in Brynmawr sind nach der Art einer Translationsfläche geformt (Abb. 10).

Gegensinnige Hauptkrümmungen (Sattelschalen) Abb. 3

Nach der Art ihrer Entstehung können auch hier Rotationsflächen und Translationsflächen unterschieden werden. Die Rotationsfläche entsteht durch Drehung einer ebenen Kurve um eine in ihrer Ebene liegende Drehachse, wobei die erzeugende Kurve, soll eine Sattelfläche mit gegensinnigen Hauptkrümmungen entstehen, konvex zur Drehachse sein muß. Die bekannteste Form einer solchen Sattelfläche ist das einschalige Hyperboloid, das durch Drehung einer Hyperbel um ihre imaginäre Achse entsteht. Aus dem Rotationshyperboloid kann, wie bei allen Rotationsflächen, durch affine Transformation die allgemeinere Form des einschaligen Hyperboloids erzeugt werden.

Als Beispiel ist der Parlamentssaal in Chandigarh von Le Corbusier zu nennen (Abb. 11). Im Industriebau sind häufig Kühltürme in der Art eines einschaligen Rotationshyperboloides geformt (Abb. 12).

Die Translationsflächen in dieser Gruppe entstehen durch Führung einer erzeugenden Kurve auf einer Leitkurve, wobei Leitkurve und Erzeugende gegensinnige Hauptkrümmungen haben. Die Ebenen der erzeugenden Kurve müssen in ihren verschiedenen Stellungen immer zueinander parallel bleiben. Ist die Erzeugende eine Parabel, die nach unten geöffnet ist, und die Leitkurve eine Parabel, die nach oben geöffnet ist, so entsteht das hyperbolische Paraboloid. Das Strahlenlaboratorium in Mexiko City von Felix Candela ist durch die Aneinanderfügung zweier identischer hyperbolischer Paraboloide entstanden (Abb. 13). Alle horizontalen Schnitte ergeben Hyperbeln, alle vertikalen Schnitte Parabeln. Eine andere Möglichkeit der Gestaltung mit hyperbolischen Paraboloiden zeigt ein Lagerhaus in Mexiko City, das ebenfalls von Candela konstruiert wurde. (Abb. 14) Die einzelnen Pilze sind aus vier HP-Flächen zusammengesetzt, die längs ihrer geraden Erzeugenden geschnitten sind.

Innerhalb der Gruppe der zweifach gekrümmten Schalen mit gegensinnigen Hauptkrümmungen soll aber noch eine weitere Unterteilung vorgenommen werden, welche die Regelflächen zu einer Gruppe zusammenfaßt. Regel ist ein alter Ausdruck für ein geradliniges Element, für ein Lineal. Regelflächen sind demnach alle gekrümmten Flächen, die durch Bewegung einer erzeugenden Geraden entlang einer oder zweier Leitlinien entstehen. So paradox es auch zunächst erscheinen mag, aber es ist möglich, nach zwei Richtungen gekrümmte Flächen durch Bewegung einer Geraden zu erzeugen (Abb. 3 unten). Die dabei entstehenden Kurven wurden teilweise in der bisherigen Einteilung schon erfaßt: das einschalige Hyperboloid zum Beispiel ist Rotationsfläche wie Regelfläche; das hyperbolische Paraboloid ist Translationsfläche wie Regelfläche. (Die einfach gekrümmten Flächen mit geraden Erzeugenden — Kegel und Zylinder — sind ebenfalls Regelflächen.)

Die allgemeine Definition der Erzeugung durch Gerade reicht aber noch nicht zur Bestimmung einer solchen Fläche aus. Es muß festgelegt werden, nach welchen Gesetzen die Gerade die begrenzenden Linien schneidet. Beim hyperbolischen Paraboloid (Abb. 3 unten links) teilt die Erzeugende zwei windschief zueinander stehende Gerade in gleich viele und auf jeder der Erzeugenden in gleich große Teile ein; beim Konoid muß die Erzeugende so geführt werden, daß sie eine feste Achse stets schneidet und zu einer festen Ebene immer parallel bleibt (Abb. 3 unten Mitte); beim einschaligen Hyperboloid teilt die Erzeugende die beiden identischen Leitkurven in gleichgroße Teile (Abb. 3 unten rechts).

Die eminente Bedeutung der Regelflächen für das Bauen wird evident, wenn man sich an die Herstellung von Stahlbeton erinnert. Beton wird als breiige Masse in Formen gegossen, die aus Schalungsbrettern hergestellt werden, und erhärtet darin. Stabtragwerke ermöglichen infolge ihrer geradlinigen Struktur einfache Schalungsformen, ein Vorteil, der nicht hoch genug einzuschätzen ist (Abb. 15). Doppelt gekrümmte Formen dagegen erfordern zumeist eine sehr aufwendige und teure Schalung, da geradlinige Schalungselemente einer doppelt gekrümmten Form angepaßt werden müssen (Abb. 16). Stahlbetonbau ist eine lohnintensive Baumethode; der Senkung der Schalungskosten kommt deshalb große Bedeutung zu. Bei Regelflächen, deren Erzeugende Gerade sind, kann die Schalung mit Hilfe schmaler, geradliniger Bretter hergestellt werden. Hat die Fläche zwei Scharen gerader Erzeugender — das ist beim einschaligen Hyperboloid und beim hyperbolischen Paraboloid der Fall —, dann können in Richtung der einen Erzeugenden die Schalungsbretter und in Richtung der anderen Erzeugenden die Aussteifungshölzer gelegt werden. Abb. 17 zeigt eine aus zwei hyperbolischen Paraboloiden zusammengesetzte Konstruktion, bei der die geraden Erzeugenden eingezeichnet sind.

Dem Schalungsproblem kommt nicht mehr diese überragende Bedeutung zu, wenn Stahlbetonfertigelemente verwendet werden. Die Schalungsform braucht nicht mehr aus Brettern hergestellt zu werden. Die Kosten der Schalung amortisieren sich, da die Formen immer wieder benutzt werden können. Zudem entfällt die im Ortbetonbau notwendige Unterkonstruktion der Schalung, die bei doppelt gekrümmten Flächen sehr aufwendig ist. Da doppelt gekrümmte Flächen den einfach gekrümmten konstruktiv überlegen sind, andererseits aber durch hohe Schalungskosten verteuert werden, könnten durch Vorfertigung derartiger Konstruktionselemente günstige Resultate in wirtschaftlicher und konstruktiver Hinsicht erzielt werden.

15
Aufstellung der Schalung für ein normales Stahlbetonskelett. Zeisswerke in Jena.

Pose du coffrage pour un squelette normal en béton armé. Usines Zeiss à Jena.

Setting up of framing for a standard reinforced concrete skeleton. Zeiss Works in Jena.

16
Aufstellung der Schalung für eine doppelt gekrümmte Form. Wasserkraftwerk Steckingen.

Pose du coffrage pour une forme à deux nappes. Usine de force motrice Steckingen.

Setting up of framing for a double-surface form. Power station, Steckingen.

17
Durchdringung von zwei hyperbolischen Paraboloiden in der Art eines Kreuzgewölbes. Die Geraden Erzeugenden der Fläche sind eingezeichnet.

Intersection de deux paraboloïdes hyperboliques dans le genre d'une voûte croisée. Les droites génératrices des surfaces sont dessinées.

Intersection of two hyperbolic paraboloids in the manner of a cross-arched vault. The straight line generatrices producing the surfaces are indicated.