

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	95 (1977)
<b>Heft:</b>	5
<b>Artikel:</b>	Weitgespannte Betonkonstruktionen im Hallenbau: Systeme, Baustoffe, Bauverfahren, Bauwerke
<b>Autor:</b>	Bomhard, Helmut
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-73328">https://doi.org/10.5169/seals-73328</a>

### 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:** 08.02.2026

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

## Weitgespannte Betonkonstruktionen im Hallenbau

### Systeme, Baustoffe, Bauverfahren, Bauwerke

Von Helmut Bomhard, München<sup>1)</sup>

*Entwurf, Konstruktion und Bau weitgespannter Hallen aus Beton werden heute entscheidend beeinflusst durch die Vorspannung des Betons, die Vorfertigung und die Entwicklung der Bauverfahren sowie neuerdings durch den konstruktiven Leichtbeton. Am Beispiel einiger ausgewählter Bauten wird die grosse baupraktische Bedeutung dieser Einflussgrössen für die verschiedenen Tragwerke ersichtlich. Die Tragkonstruktionen der angeführten Bauten sind sämtlich Entwürfe der Dyckerhoff & Widmann AG, die im Wettbewerb durchgesetzt werden mussten.*

#### Entwicklungstendenzen

Im Grosshallenbau mit Beton wurden die durch die heutigen Systeme und Mittel abgesteckten Grenzen auch mit den bisher grössten Ausführungen nicht annähernd erreicht. Erheblich grössere Spannweiten sind technisch und wirtschaftlich möglich.

Die Entwicklung im Hallenbau wird heute entscheidend beeinflusst durch die *Vorspannung* des Betons, die *Vorfertigung*, die *Rationalisierung* und *Mechanisierung* der Bauverfahren; neuerdings gewinnt der *konstruktive Leichtbeton* grosse Bedeutung.

Mit Hilfe der Vorspannung erhält Stahlbeton ähnlich günstige Eigenschaften, wie sie Stahl und Holz als druck- und zugfeste Baustoffe von Haus aus besitzen. Die Vorspannung hat deshalb die Möglichkeiten des Stahlbetons bei weitgespannten Konstruktionen umwälzend verändert. Dem Betonbau ist zusätzlich zu den auf Biegung und Druck arbeitenden Systemen nun das gesamte Gebiet der zugbeanspruchten Konstruktionen offen. Bei allen Tragwerken lassen sich grosse und grösste Zugkräfte in verhältnismässig kleinen Betonquerschnitten unterbringen, weil das Vorwegnehmen der Stahldehnung das Ausnutzen hochfester Spannstähle zulässt. Daraus ergeben sich besonders grosse Querschnitteinsparungen bei weitgespannten Tragwerken.

Bei den Bauverfahren geht die Entwicklung von der Voll-einrüstung weg zum abschnittsweise Bauen mit verschiebbarer oder umsetzbarer Rüstung und weiter zum vollständigen Verzicht auf eine Rüstung, wo immer dies möglich ist. Das Bauen ohne Rüstung gelingt vor allem bei Hängedächern. Ganz allgemein gewinnen Grossfertigteile, die am Boden unter den dort günstigeren Arbeitsbedingungen gefertigt und anschliessend hydraulisch in ihre Endlage gehoben werden, mehr und mehr an Bedeutung. Schliesslich werden wirtschaftliche Taktverfahren mit möglichst gleichen Arbeitsgängen, die sich mehrfach wiederholen, angestrebt.

Hochfester Leichtbeton ist nicht mehr Wunsch, sondern Realität [1] und [8]. Wir haben Baustellenerfahrung mit kon-

struktivem Leichtbeton bis zur Güte LBN 450 neuer Klassifizierung und mit einer Trockenrohdichte von  $1,5 \text{ t/m}^3$ . Für LBN 550 fehlt die Baustellenerfahrung noch. Doch zeigen umfangreiche Versuchsreihen, die die Dyckerhoff & Widmann AG in ihren Laboratorien und in Zusammenarbeit mit dem Materialprüfamt für das Bauwesen der TU München durchführt, dass auch diese Güte auf Baustellen zuverlässig erreichbar ist.

Was die kleinere Betonrohdichte des Leichtbetons für den Hallenbau bedeutet, ist mit wenigen Worten gesagt. Sie bedeutet zunächst einmal leichtere Dachtragwerke und als deren Folge nicht nur leichtere, sondern häufig auch einfache Stützkonstruktionen. Bei grossen Spannweiten, wenn die Tragwerksgewichte das Mehrfache der Verkehrslasten ausmachen, hilft uns das sehr. Die kleinere Betonrohdichte bedeutet bei gleicher Festigkeit aber auch eine Steigerung der Zerdrückhöhe des Betons, wie wir das Verhältnis Druckfestigkeit/Berechnungsgewicht  $\beta_R/\gamma$  nennen, auf das  $\gamma_b/\gamma_{lb} \approx 3/2$ fache ( $b = \text{Normalbeton}$ ,  $lb = \text{Leichtbeton}$ ). Das ist für Balken und Druckbögen bedeutsam, weil die mit ihnen erreichbare Spannweite mit der Zerdrückhöhe wächst. Bei Zugbögen dagegen kommt es, wenn sie biegeweich sind, nicht auf die Zerdrückhöhe an, sondern nur auf das Berechnungsgewicht  $\gamma$ , also auf die kleinere Betonrohdichte.

#### Das Leistungsvermögen der Tragwerke

##### Einflussgrössen der Spannweite

Das Leistungsvermögen eines Tragwerks, eines Balkens oder eines Bogens beispielsweise, messen wir an der mit ihm erreichbaren Spannweite. Diese ist eine Funktion des Systems und seiner Randbedingungen, seiner Form und seiner Baustoffe und der Totlast, die getragen werden muss [9].

Totlast ist für das System alles, was nicht zu seinen tragenden Querschnitten gehört, wie etwa bei einem Balken das Gewicht von Pfetten, die quer zu ihm gespannt sind, und die gesamte Verkehrslast. Ganz allgemein gilt es, bei grossen Spannweiten das tote Gewicht klein zu halten. Es mindert nicht nur die Leistung, sondern braucht zusätzlich aktives Gewicht, umgetragen zu werden, vergrössert also die Baumasse des Systems. Flächentragwerke haben weniger totes Gewicht als Skelettragwerke.

Jedes Tragwerk einer Dachkonstruktion lässt sich im Prinzip aus den Grundformen Balken, Druckbögen und Zugbögen aufbauen. Das Leistungsvermögen dieser Grundformen ist mathematisch erfassbar [9]. Wir müssen uns hier mit der Feststellung begnügen, dass die Folge Balken–Druckbogen–Zugbogen die Möglichkeiten einer Steigerung der Weite des frei zu überspannenden Raumes ausdrückt. Die Folge sagt, welche Grundformen von Konstruktionen zur Lösung von Bauaufgaben mit wachsendem Spannweitenbedarf technisch, aber auch wirtschaftlich brauchbar sind. Der *biegeweiche Zugbogen* ist mit Abstand am leistungsstärksten.

<sup>1)</sup> Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten an einer Studententagung der SIA-Fachgruppe für Brückenbau und Hochbau in Lausanne.

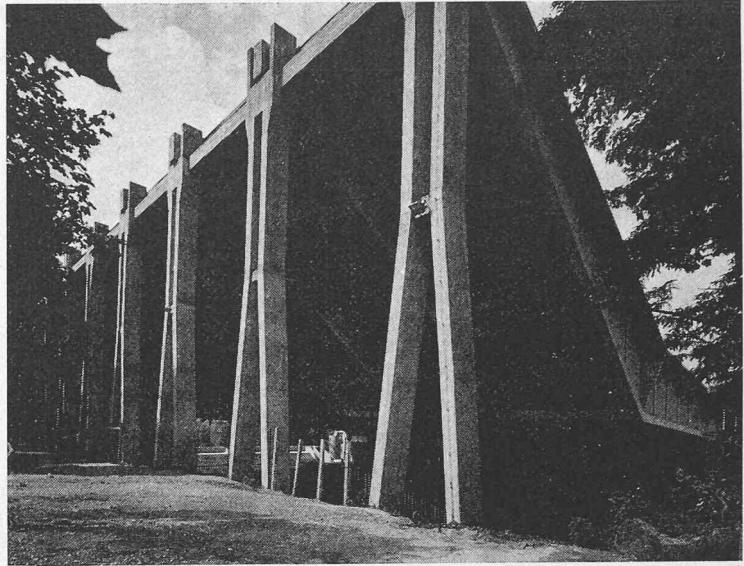
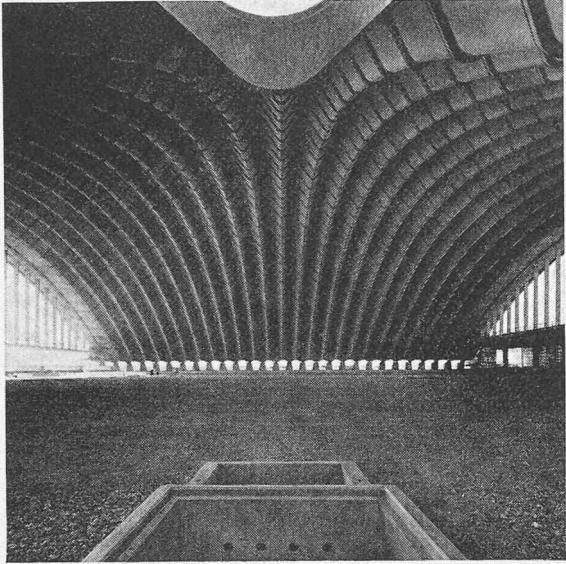


Bild 1 (links). Paketumschlaghalle München, Zweigelenkbogenfaltwerk mit 150 m Spannweite über einer Grundfläche von  $124 \times 150$  m. Die Faltung der tragenden Fläche beherrscht den Innenraum. Der Blick geht von Bogenkämpfer zu Bogenkämpfer. Das Fertigteilbecken im Vordergrund ist eines von 27, die das Niederschlagwasser entlang jeder Kämpferlinie aufnehmen

Bild 2 (rechts). Kunsteisstadion Augsburg, einfache Balken aus Spannleichtbeton mit 62 m Spannweite. Grundfläche:  $62 \text{ m} \times 78 \text{ m}$

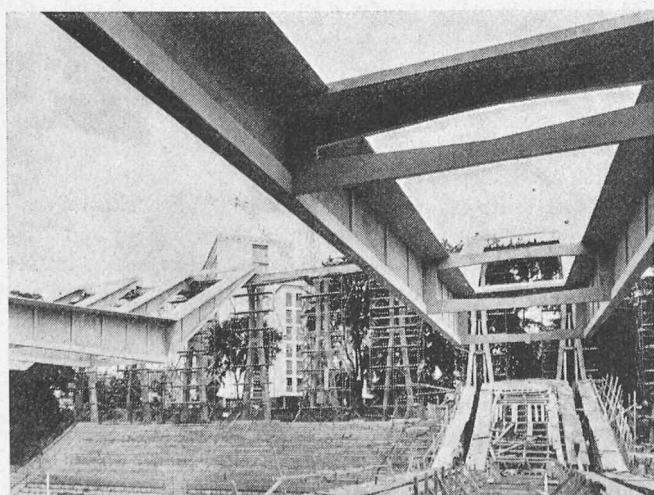
### Zur Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Bauwerks wird von so vielen Faktoren beeinflusst, dass wir sie nur im Einzelfall – und dann nicht leicht – einigermassen zutreffend beurteilen können. Allgemeine wirtschaftliche Aussagen sind deshalb nur sehr begrenzt möglich.

Die Baumasse setzt einem Tragwerk nicht die technische, wohl aber die wirtschaftliche Leistungsgrenze [9]. Sobald sie unwirtschaftlich gross wird, muss ein leistungsfähigeres Tragwerk gewählt werden, etwa statt eines einfachen Balkens ein Kragbalken.

Wir können Beton im Tragwerk wie keinen anderen Baustoff formen und die Baumasse genau an die richtigen Stellen bringen, wenn das sinnvoll ist. Der Kragbalken ist dafür ein hervorragendes Beispiel. Allein durch die Form bekommt seine Baumasse einen hohen Wirkungsgrad. Der Kragbalken wird dadurch leistungsfähiger als der einfache Balken.

Bild 4. Kunsteisstadion Augsburg. Rechts: Balkenpaar über der Fertigstellungsstelle nach dem Heben und vor dem waagrechten Verziehen. Links: Balkenpaare in Endposition



Das Tragwerk mit der kleinsten Baumasse ist der biegeweiche Zugbogen. Er muss nicht das Gewicht einer Biegedruckzone mitschleppen wie der Balken oder wie der Druckbogen. Gewicht, das ihm die notwendige Steifigkeit verleiht. Aus dieser Tatsache dürfen wir aber nicht voreilig schliessen, der biegeweiche Zugbogen sei von Haus aus auch das wirtschaftlichste Tragwerk, denn jeder Balken oder Bogen bildet mit seinen Stützkonstruktionen eine Einheit. Nur für diese sind wirtschaftliche Aussagen möglich, zusammen mit den Baustoffen, den technologischen Verfahren und dem Aufwand für die Instandhaltung. Ein erdverankerter Zugbogen braucht zum Ableiten der hochangreifenden Bogenschübe erheblich aufwendigere Stützkonstruktionen als etwa ein Balken oder ein Druckbogen. Schon allein deshalb wird nicht das leichteste Tragwerk zugleich auch das wirtschaftlichste sein.

Bemerkenswert: die weitestgespannten Druck- und Zugbogen der Hallen sind Betonkonstruktionen. Balkentragwerke werden mit Hilfe des Leichtbetons weiter vordringen.

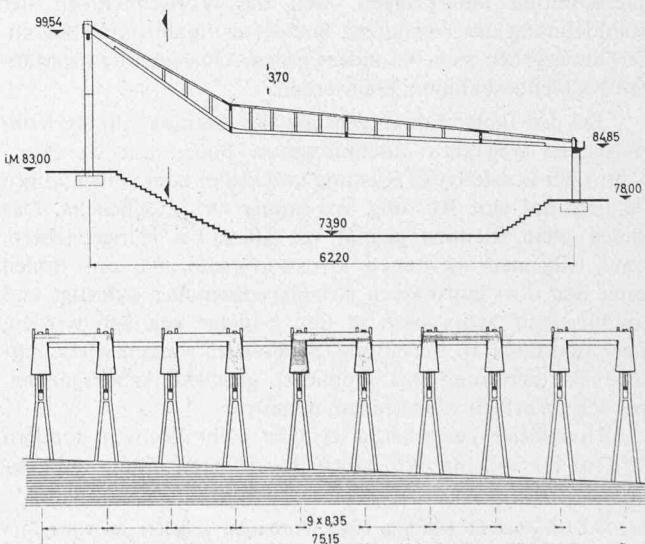


Bild 3. Kunsteisstadion Augsburg, Längs- und Querschnitt

An einigen ausgewählten Bauwerken soll gezeigt werden, wie das Tragwerk, wie Vorspannung, Vorfertigung, Bauverfahren und Konstruktionsleichtbeton die Lösung der Aufgabe beeinflussen, eine grosse Hallenkonstruktion für einen bestimmten Zweck zu entwerfen und zu bauen.

### Balkentragwerke

*Einfacher Balken* und *Kragbalken* sind Grenzfälle von Balkensystemen, wenn wir von seilverspannten Balken abssehen. Der einfache Balken begrenzt das Leistungsvermögen nach unten, der Kragbalken nach oben. Von grossem Einfluss ist die Form. Sie wird bestimmt durch Querschnittsform und Querschnittsverlauf.

Als Querschnittsform wäre ein Zweipunktquerschnitt ideal, bei dem die gesamte Betonfläche im Druckgurt konzentriert ist. Diese ideale Form ist natürlich nicht erreichbar, weil Zuggurt und Steg allein schon technologisch nicht ohne eigene Flächen auskommen.

Querschnittsverlauf und Momentverlauf wird man bei grossen Spannweiten aufeinander abstimmen müssen, um alle Querschnitte einigermaßen gleich auszunutzen und die Baumasse klein zu halten. Ideal wäre der Balken gleicher Festigkeit, der überall voll beansprucht ist, bei dem also die Baumasse genau an den richtigen Stellen sitzt. Dieses Abstimmen ist bei Kragbalken viel wirksamer und damit wichtiger als bei einfachen Balken. Das ist in der unterschiedlichen Völligkeit des Momentbildes beider Systeme begründet. Der Kragbalken wird dadurch viel leistungsfähiger als der einfache Balken und kann viel weiter gespannt werden.

### Beispiel Kunsteisstadion Augsburg

Mit einfachen Balken von 62,2 m Spannweite ist ein an drei Seiten offener Hallenraum von rund 5000 m<sup>2</sup> Nutzfläche überdacht (Bilder 2 und 3). Geschlossen ist nur die niedrigste Seite.

Der Balkenquerschnitt ist dem Zweipunktquerschnitt gut angepasst: Obergurt als Druckgurt wegen der Kippgefahr breit (2,5 m) und nur so dick (i.M. 15 cm) dass keine Beulgefahr besteht, Steg als Schubverbindung nicht dicker als technologisch notwendig (10 cm) und Untergurt als Zuggurt nur so gross (44/44 cm), dass die Spannglieder Platz finden. Der Steg hat bei 3,7 m grösster Balkenhöhe das Schlankheitsmass von Stahlwalzprofilen. Er ist aus liegend betonierten Fertigteilplatten zusammengesetzt, die mit Ort betonrippen «vernaht» sind. Nur so gelingt es, derart schlanke Stege zu bauen. Baustoff ist Spannleichtbeton LB 450 mit 1,5 t/m<sup>3</sup> Trockenrohdichte.

Die Balken sind paarweise durch Querrahmen verbunden (s. Bild 4). So entstehen in der Ebene der Balkenobergurte 5 Vierendeelträger zur Aufnahme der waagrechten Windkräfte auf die Balkenseitenflächen. Die Dachfläche zwischen

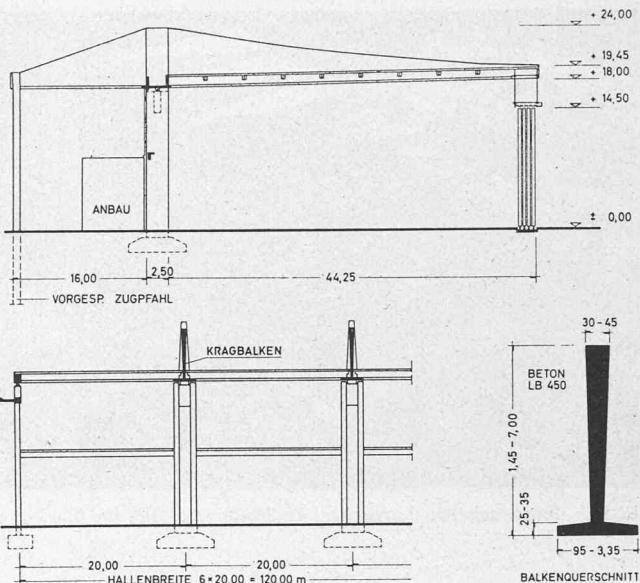


Bild 6. Flugzeughallen Landsberg, Längs- und Querschnitt durch eine Halle, Balkenquerschnitt

den Obergurten besteht aus Trapezblechen, die bei einem Balkenabstand von 8,35 m ohne Pfetten von Gurt zu Gurt gespannt sind. Der Abstand liegt an der oberen Grenze dessen, was ohne Pfetten möglich ist. Mit einer solch leichten Fläche (42 kp/m<sup>2</sup>) ist das tote Gewicht sehr klein, es macht nur 16% der Baumasse aus, die 12,0 cm Beton/m<sup>2</sup> Nutzfläche entspricht. Das ist weniger Beton, als ein Flächentragwerk brauchen würde.

Die Stützkonstruktion (s. Bild 3) ist, wie stets bei einfachen Balken, wenig aufwendig und wird in ihrer Form sehr wesentlich vom Bauverfahren bestimmt: Stützenpaare, am oberen Ende durch einen Riegel miteinander verbunden und an der hohen Hallenseite der Windkräfte wegen leicht gespreizt.

Das Bauverfahren arbeitete mit einer ortsfesten Fertigungsstelle am Rand der Eispiste, also am Boden, und hydraulischen Hub- und Ziehvorgängen (Bild 4). Binderpaar nach Binderpaar wurde als Grossfertigteile am Boden betoniert, hydraulisch ziehend lotrecht gehoben und anschliessend horizontal auf einer Gleitbahn über den Riegeln in die Endposition gezogen. Auch das Ziehen geschah hydraulisch. Die Taktzeit für ein Binderpaar war 3 Wochen.

### Beispiel Flugzeughallen Landsberg

Mit Kragbalken von 45,5 m Spannweite sind drei Wartungs- und Abstellhallen überdacht, jede mit rund 6000 m<sup>2</sup> Nutzfläche und 120 m Torlänge (Bild 5).

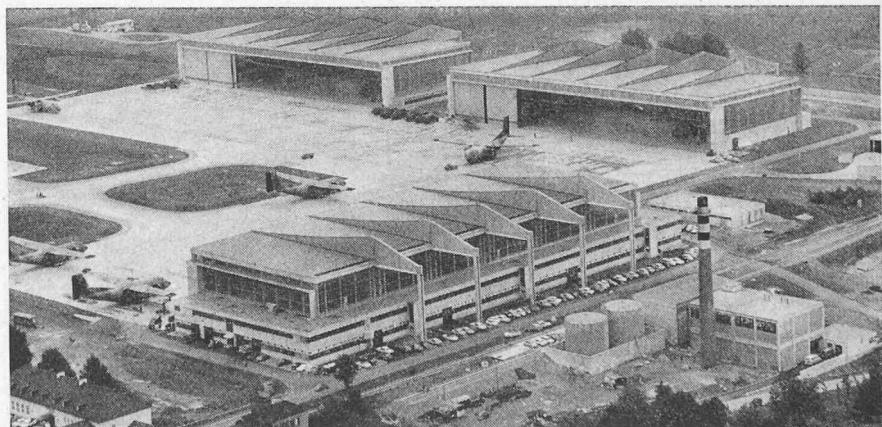


Bild 5. Flugzeughallen Landsberg, Kragbalken aus Spannleichtbeton mit 46 m Spannweite. Grundfläche je Halle: 46×120 m, lichte Höhe: 18 m, Torlänge: 120 m

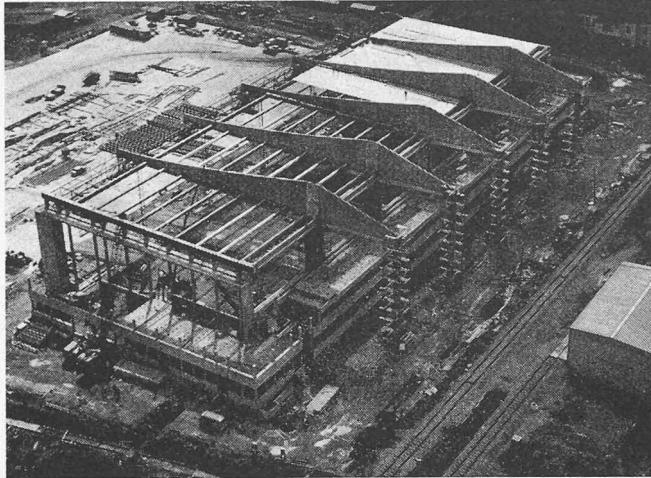


Bild 7. Flugzeughallen Landsberg, Hallenkonstruktion im Bau

Der Balkenquerschnitt ist ein umgedrehtes T (Bild 6): verhältnismässig schlanker Steg und zur Einspannstelle hin breiter werdender Druckgurt. Bei 45 m Spannweite kommt es noch nicht auf einen besonders schlanken, leichten Steg an. Bauhöhenverlauf und Baumassenverteilung ergeben sich aus dem Wunsch, jeden Querschnitt möglichst voll auszunutzen. Baustoff der auskragenden Balkenteile ist Spanngleichtbeton LB 450 mit 1,5 t/m<sup>3</sup> Trockenrohdichte.

Die Kragbalken würden bei gleicher Belastung, einer von links, einer von rechts auskragend, eine freie Weite von  $2 \cdot 45,5 = 91,0$  m überspannen, bei nur 10 cm Beton/m<sup>2</sup> Nutzfläche. Tatsächlich könnte bei gleicher Baumasse die freie Weite erheblich grösser sein, wenn an der Kragbalkenspitze der Torführungsträger fehlte, der bei den Flugzeughallen einen beachtlichen Teil des Tragvermögens beansprucht. Das tote Gewicht macht dort 50% der Baumasse der Kragträger aus, bedingt durch den Torführungsträger und eine Krananlage.

Die Untergurte der fünf Balken einer Halle bilden zusammen mit einer Betonrinne und dem stählernen Torführungsträger ein Vierendeelsystem in der Dachfläche für die waagrechten Windkräfte auf die Balkenseitenflächen (s. Bilder 6 und 7).

Die Dachfläche selbst besteht aus Trapezblechen auf Stahlleichtpfetten und ist 30 kp/m<sup>2</sup> schwer. 20 m Balkenabstand scheinen gross zu sein, doch ist das, Balken und Stützkonstruktion zusammen gesehen, ein recht günstiges Mass.

Die Stützkonstruktion braucht neben Druckstützen auch Zugstützen, weil das Kragmoment verankert werden muss (Bilder 6 und 7). Die Zugstützenkraft übernimmt ein vorgefertigter Spannbeton-Grosszugpfahl mit 1000 Mp Tragver-

mögen, der für diesen Hallentyp entwickelt worden ist. Alle Stützen sind wegen des Bauverfahrens paarweise angeordnet.

Die Balken wurden nacheinander als Grossfertigteile am Boden betoniert und hydraulisch ziehend mit dem Dywidag-Hubverfahren in die Endlage gehoben. Dazu war eine Taktzeit von etwa 3 Wochen nötig.

#### Druckbogentragwerke

Die konvexe Form des Druckbogens ist keine Form minimaler potentieller Energie. Druckbogen wollen deshalb nach unten durchschlagen. Die Durchschlaggefahr ist um so grösser, je mehr Biegemomente sie erhalten und je schlanker sie sind. Das Leistungsvermögen sinkt dadurch stark ab.

Bei Druckbogen grosser Spannweite müssen wir deshalb die Baumasse, vor allem im Bogenquerschnitt, wirksam verteilen, damit sie den grossen Biegemomenten aus ungleichmässigen Schne- und Windlasten, aus Temperaturwirkungen und aus den schlankheitsbedingten Bogenverformungen (Theorie 2. Ordnung) widerstehen können. Ein Faltquerschnitt ist dafür meist ausreichend, wie das Beispiel der Paketumschlaghalle in München zeigt. Kostspielige Hohlquerschnitte sind im Hallenbau nur bei grösssten Spannweiten notwendig und richtig. Das beweisen die Untersuchungen des Traglastproblems ebener Druckbogen [2, 3]. Hohlquerschnitte setzen ziemlich kleine Schlankheitsmasse, also gedrungene Bogen voraus, damit die Querschnitte bis zum Versagen des Bogens ungerissen bleiben. Nur dann sind sie einem mehr rechteckigen Querschnitt entscheidend überlegen. Für die Wanddicken flächenhafter Bogen genügen meist Mindestwerte, die technologisch bedingt sind.

Leichtbeton als Bogenbaustoff wird sehr oft – nicht nur für die Gründung – vorteilhaft sein und am besten mit einfachen Querschnittsformen kombiniert [2].

#### Beispiel Paketumschlaghalle München [4]

Mit einem Bogenfaltwerk von rund 20000 m<sup>2</sup> Grundfläche sind die Gleisanlagen des Postpaketamtes 3 in München frei überspannt (Bilder 1, 8 und 9). Der Hallenraum ist an drei Seiten offen. Das Zweigelenkbogenfaltwerk zählt mit 150 m Spannweite zu den derzeit weitestgespannten Hallenkonstruktionen der Erde. Bei dieser grossen Spannweite war es ein Gebot der Wirtschaftlichkeit, die raumabschliessende und die tragende Funktion zu vereinen, also ein Flächentragwerk zu wählen, das die unmittelbare Ableitung aller Lasten auf kürzestem Weg ermöglicht und das die kleinstmögliche Totlast besitzt.

Da wasserundurchlässiger Beton kein Problem des Baustoffs, sondern eines der Konstruktion und der Fertigung ist, lag bei dieser offenen Halle der Gedanke nahe, die Dachfläche ohne den üblichen Schutz durch Wärmeisolierung und wasser-

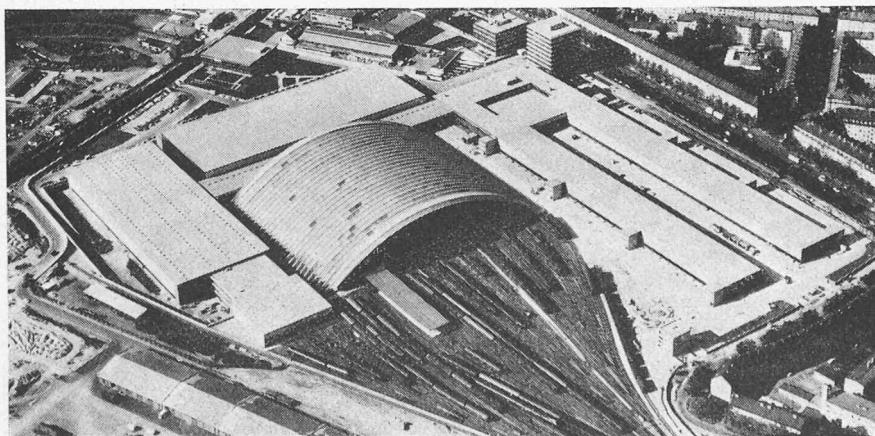


Bild 8. Paketumschlaghalle München, Zweigelenkbogenfaltwerk mit 150 m Spannweite

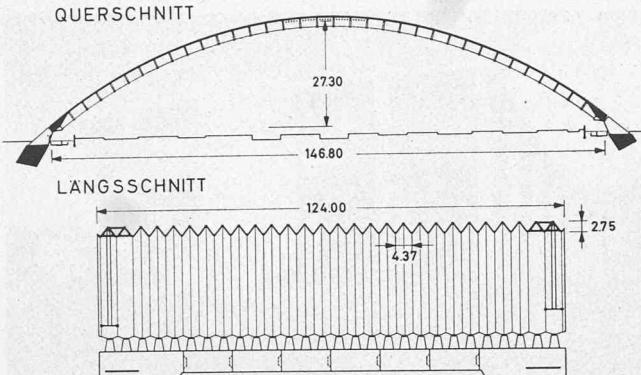


Bild 9. Paketumschlaghalle München, Längs- und Querschnitt

dichte Dachhaut zu entwerfen. Dies um so mehr, als eine besondere wasserdichte Haut hohe Kosten verursacht und instand gehalten werden muss. Der Entwurfsgedanke hat sich als richtig erwiesen. Die Fläche ist nach 9 Jahren noch ebenso wasserdicht und rissfrei wie am Anfang. Der Beton ist i.M. weniger als 1 mm tief karbonatisiert.

Die richtige Formgebung der grossen Betonfläche wird damit äusserst wichtig, da sie allen Einflüssen des Wetters ausgesetzt ist: Sonnenschein, Regen, Schnee und Eis sowie Wetterstürzen. Diesen Naturgewalten darf sich das Tragwerk nicht widersetzen. Es muss sich ihnen vielmehr anpassen und ohne grossen Zwang ihren Einflüssen elastisch federnd folgen. Durch die Wölbung ist ein Bogen in seiner Ebene von Haus aus nachgiebig. Senkrecht dazu schafft die Elastizität der Faltung dafür ideale Voraussetzungen (Bild 10).

Im Bogenquerschnitt ist die Baumasse in den Grat- und Rinnenknoten, also an den Rändern, konzentriert und trägt so besonders wirkungsvoll zur Steifigkeit bei. Die dünne Platte zwischen den Knoten mit technologisch notwendiger Mindestdicke (8,5 cm) ist Tragelement und Raumabschluss zugleich. Ausdehnungen oder Verkürzungen können durch Neigungsänderungen der Falten ausgeglichen werden, die nur mit kleinen Querbiegemomenten verbunden sind. An den Hallenden wäre der Faltquerschnitt nicht ausreichend tragfähig, weil dort die grossen verglasten Stirnwände am Gewölbe aufgehängt sind und hohe Beanspruchungen hervorrufen. Hier sind jeweils zwei Falten zu einem mehrzelligen Hohlquerschnitt zusammengefasst (Bild 11).

Ein so konzipiertes Tragwerk liesse sich nur mit grossem Aufwand an Ort und Stelle betonieren. Alle Bogen wurden daher aus Fertigteilen zusammengesetzt. Der Zusammenbau solcher vor dem Einbau auf Wasserdichtigkeit geprüfter Teile ist die beste Voraussetzung für eine wasserundurchlässige Fläche. An Ort und Stelle eingebrachter Beton dient lediglich dazu, die einzelnen Teile zu einem monolithisch wirkenden Tragwerk zu verbinden (Bild 12).

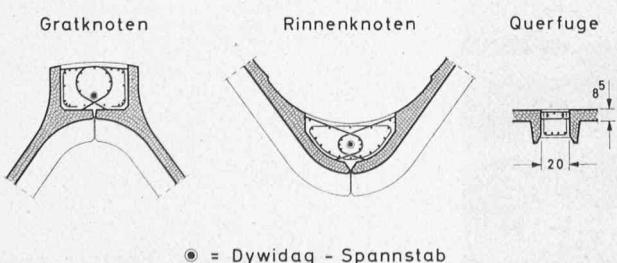


Bild 12. Paketumschlaghalle München, Verbindung der Fertigteile durch Ortbeton zum monolithisch wirkenden Bogentragwerk und Bewehrungsschema des Ortbetons

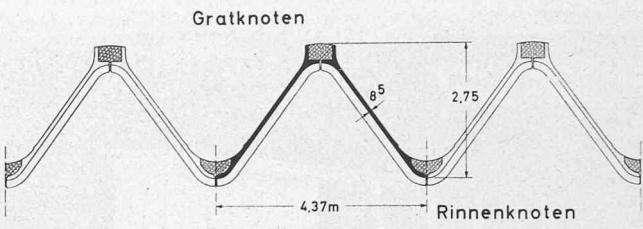


Bild 10. Paketumschlaghalle München, Querschnitt eines Normalbogens

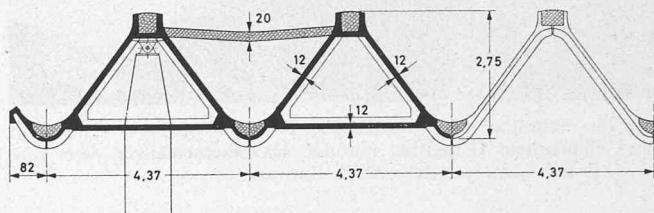


Bild 11. Paketumschlaghalle München, Querschnitt eines Stirnbogens

Die Stützkonstruktionen des Faltwerks sind einfach, weil die Druckbogen ihren Schub selbst zur Erdscheibe abtragen, während ein Zugbogen dazu vielfach hohe Endwiderlager benötigt. In [5] ist in dieser Hinsicht ein Druckbogen mit einem Zugbogen verglichen. Das Bogenfaltwerk ist als eine Reihung gleicher für sich standfester Bogen entworfen. Es lässt sich deshalb gut abschnittsweise auf verschiebbares Lehrgerüst ausführen. Gebaut wurde in 10 Abschnitten: am Anfang und Ende je ein «Stirnbogen» mit Kastenquerschnitt, dazwischen acht «Normalbogenabschnitte» mit je drei Falten (Bild 13). Jeder Bauabschnitt musste ausgerüstet, unter seinem Gewicht also verformt sein, bevor er mit dem bereits fertigen Hallenteil durch Ausbetonieren der Rinne an den Abschnittsgrenzen verbunden werden konnte. Der Bau des Faltwerks dauerte 7 Monate.

Vor 11 Jahren, als die Paketumschlaghalle entworfen wurde, bestand keine Möglichkeit, Leichtbeton in die Überlegungen einzubeziehen. Heute würde man das Faltwerk aus LBN 450 bauen.

#### Zugbogentragwerke

Zugbogen können sehr viel weiter gespannt werden als Balken oder Druckbogen, besonders wenn sie biegeelastisch sind. Das ist in der dann ausschliesslich mittigen Beanspruchung und damit vollen Querschnittsausnutzung begründet. Zu einem überlegenen Leistungsvermögen braucht der Zug-

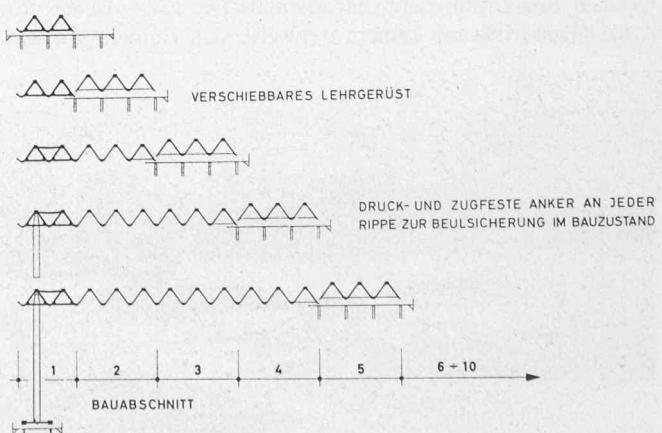


Bild 13. Paketumschlaghalle München, Schema der Bauausführung in 10 Bauabschnitten

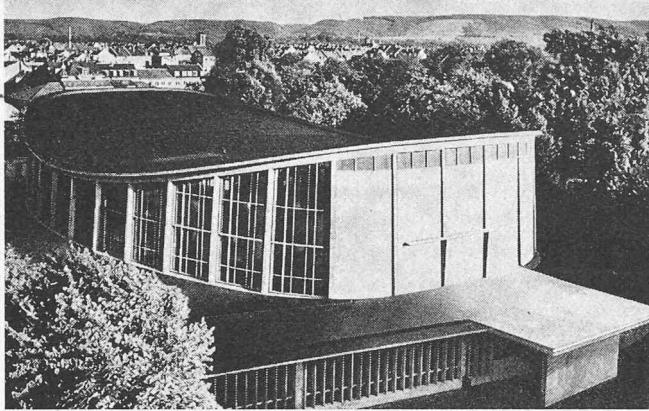


Bild 14. Schwarzwaldhalle Karlsruhe, in sich verspanntes Hängedach über elliptischem Grundriss, mit den Hauptachsenlängen 48 m und 73 m. Erstes Spannbetonhängedach Europas

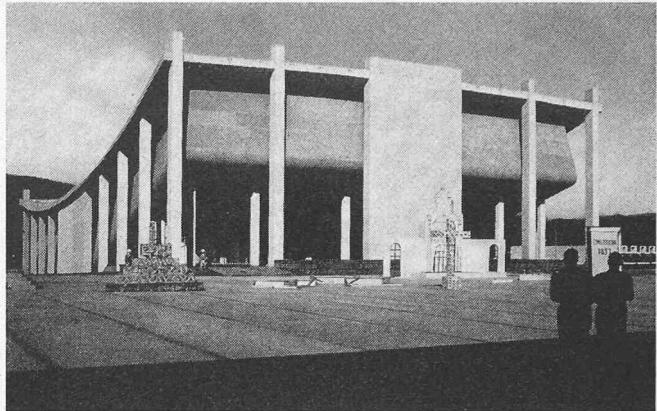


Bild 15. Auditorium Jalapa, Mexiko. In sich verspanntes Hängedach mit 71 m Spannweite über einer Grundfläche von  $40 \times 71$  m

bogen einen hohen Bewehrungsgehalt. Bogen- oder Querschnittsform sind kaum von Einfluss. Der Bewehrungsgehalt des biegeweichen Bogens kann den von Balken und Druckbogen weit übertreffen, weil es für ihn das Tragvermögen einer Biegendruckzone als Grenze nicht gibt. Er ist nur noch technologisch begrenzt.

Bei jedem Entwurf eines Zugbogentragwerks gilt es vor allem zwei Probleme gut und mit wenig Aufwand zu lösen:

- das der hochangreifenden Schübe des Zugbogens und
- das der kinematischen Verschieblichkeit des biegeweichen Bogens.

Nur wenn dies gelingt, dürfen wir bei den heute im Hallenbau normalerweise gefragten Spannweiten hoffen, ein Zugbogentragwerk im Wettbewerb mit anderen Tragwerken durchsetzen zu können. Das gilt für alle Baustoffe.

Der biegeweiche Bogen ist kinematisch verschieblich, weil seine Form stets Seileck zur jeweiligen Belastung sein muss. Die Verschieblichkeit ist um so grösser, je kleiner der Horizontalschub ist. Das hängt nicht nur vom Durchhang ab, denn der Schub kann auch klein werden, wenn der Windsog und bei einseitig offenen Hallen zusätzlich der Aufblaseffekt des Windes das Bogengewicht mehr oder weniger aufheben. Ein zu leichter Bogen kann schliesslich nach oben durchschlagen. Dieses Durchschlagproblem ist unabhängig vom Leistungsvermögen.

#### *Beispiel Schwarzwaldhalle Karlsruhe*

Wie die wirtschaftlichste Lösung der beiden dem Zugbogen eigenen Probleme, nämlich Ableitung der hochangreifenden Schübe und kinematische Verschieblichkeit des biegeweichen Bogens, aussieht, hat erstmals Dr. Finsterwalder für ovale Grundrisse mit seinem wegweisenden Entwurf für das

Hängedach der Schwarzwaldhalle gezeigt (Bild 14). Diese Lösung ist eine Zugschale. Die Horizontalkomponenten der Bogenschübe werden von einem Randdruckring aufgenommen und damit in der Dachfläche selbst ins Gleichgewicht gesetzt. Nur die Vertikalkomponenten der Schübe müssen über lotrechte Stützen zum Boden abgeleitet werden. Eine solche Zugschale aus Spannbeton ist in erster Näherung eine «starre» Fläche ohne kinematische Verschieblichkeit und ohne Schwingsprobleme und der allein notwendigen lotrechten Stützung wegen vor allem sehr wirtschaftlich. Der Zugbogen wird so auch zum Tragwerk für kleinere Spannweiten.

Zwei erheblich grössere Hallen, die aus den USA bekanntgeworden sind, bestätigen die Wirtschaftlichkeit dieser Konstruktionsform auch bei grösseren Spannweiten: das Coliseum in Phoenix mit einem Kreisgrundriss von 115 m Durchmesser und die Oklahoma State Fair Arena mit einem elliptischen Grundriss der Hauptachsenlängen 92 und 116 m.

#### *Beispiel Auditorium Jalapa, Mexiko [6]*

Die Zugschalenlösungen mit Stützkonstruktionen für nur lotrechte Kräfte ist auch bei Rechteckgrundrissen möglich. Dort allerdings mit Einschränkungen. Während ovale und runde Grundrisse sehr gross werden können, wenn am gesamten Umfang lotrechte Stützen vorhanden sind, darf die Schmalseite eines Rechtecks, an der die Zugbogen verankert sind, nicht länger als 40 bis 50 m sein. Sonst wird die Biegebeanspruchung des Randträgers, der den Bogenschub aufnimmt, zu gross.

Ein Beispiel für diese Konstruktionsform ist das für einen mexikanischen Lizenznehmer entworfene Hängedach des Auditoriums in Jalapa, das einen Grundriss von  $40 \times 71$  m frei überspannt (Bild 15).

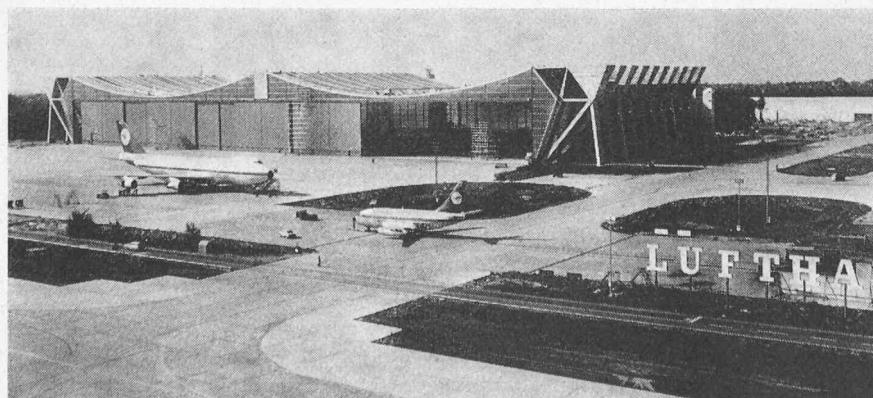


Bild 16. Wartungshalle V, Frankfurt, zweischiffiges erdverankertes Hängedach aus Spannbeton mit  $2 \times 130$  m Spannweite. Grundfläche:  $270 \times 100$  m, lichte Höhe: 22 m, Torlänge: 270 m

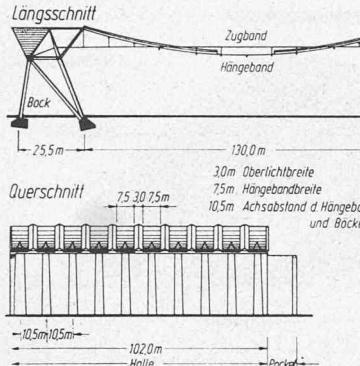


Bild 17. Wartungshalle V, Frankfurt, Längs- und Querschnitt

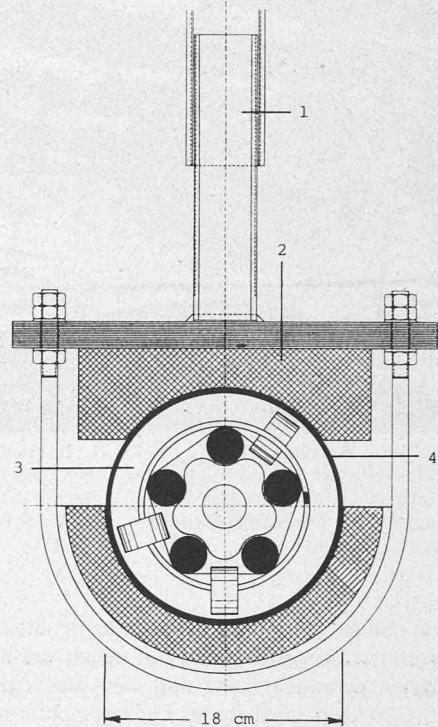


Bild 18 (rechts). Wartungshalle V, Frankfurt, Querschnitt des Zugbandes mit Aufhängung an den Versteifungsträgern. 1 Aufhängung an Versteifungsträger, 2 Elastomerlager, 3 Einpressmörtel, 4 Polyäthylenrohr, 5 Dywidag-Gewindespansstäbe  $\varnothing$  26,5 mm, St 80/105.

#### Beispiel Wartungshalle V, Flughafen Frankfurt/Main [7] [5]

Bei grossen Rechteckgrundrissen und bei grossen Toröffnungen, wie sie Flugzeughallen brauchen, ist eine Schalenlösung nicht mehr möglich. Die Bauaufgabe ist dann nur mit einem erdverankerten Zugbogentragwerk lösbar, dessen Zuggewölbe ohne Biegesteifigkeit kinematisch verschieblich sind. Die Wartungshalle V ist dafür ein ausgezeichnetes Beispiel. Sie gilt als derzeit grösste Wartungshalle der Erde, ihr Zugbogentragwerk ist zugleich auch das weitestgespannte Hängedach.

Mit einem zweischiffigen erdverankerten Hängedach ist ein rechteckiger Hallenraum von rund 30000 m<sup>2</sup> Nutzfläche frei überspannt (Bild 16). Der Raum enthält vier Wartungs- und zwei Stellplätze für die Boeing 747 oder andere Grossflugzeuge. Die Torfront ist 270 m lang.

Die Dachfläche besteht aus zehn 7,5 m breiten, über zwei Hallenschiffe von je 130 m Länge gespannten Hängebändern, die durch 3 m breite Lichtbänder voneinander getrennt sind. Die Hängebänder sind flächenhafte Zugbögen von 8,6 cm Dicke. Die Spannbewehrung aus Dywidag-Gewindestäben von 26,5 mm Durchmesser ist gleichmässig über die Bandbreite verteilt und im Bandbeton mittig angeordnet. 3 cm Betondeckung für den Korrosionsschutz der Stäbe ergeben die 8,6 cm Banddicke als technologisch erforderliches Mindestmass. Jedes Hängeband ist an seinen Außenkämpfern an den Schmalseiten der Halle an einem Fachwerkbock verankert und in der Mitte, an den Innenkämpfern, durch einen Mittelrahmen unterstützt (Bild 17).

Die Tragwerkskosten verteilen sich etwa wie 3:1 auf die Stützkonstruktionen mit Gründung und auf die Dachfläche. Da zwei Hallenschiffe den auf 1 m<sup>2</sup> Nutzfläche bezogenen Verankerungsaufwand bereits halbieren, wird damit deutlich, wie sehr der Aufwand für die Stützkonstruktionen die Kosten erdverankerter Zugbogentragwerke belastet. Die Schwarzwaldhalle beispielsweise hat als in sich verspanntes System das erheblich günstigere Verhältnis 1,25:1.

Der Entwurf ist gekennzeichnet durch zwei neue Konstruktionsgedanken, die wesentlich zur Wirtschaftlichkeit beitragen:

- die Verankerung der Bogenschübe in Bockkonstruktionen mit hochliegendem Gegengewicht und
- die Aussteifung der Hängebänder durch vorgespannte Zugbänder.

Das Gegengewicht der Fachwerkböcke verwirklicht den kurzen Kraftweg bei der Ableitung der Schübe zur Erdscheibe. Die Bogenzugkraft muss nur bis zum Fachwerknoten unter dem Gegengewicht herabgeführt werden, dort ist sie verankert. Es werden keine Zugkräfte auf den Boden abgegeben. Die Mittelunterstützung wird überwiegend lotrecht belastet und kann daher ganz anders durchgebildet sein. An ihr zeigt sich deutlich, dass die Ableitung vertikaler Kräfte erheblich weniger Aufwand erfordert als die Ableitung von Bogenschüben.

Die dünnen Hängebänder sind biegeweich und kinematisch verschieblich. Aus betrieblichen Gründen darf die lotrechte Durchbiegung der Dachfläche nicht grösser als etwa 3 % der Spannweite sein. Die Verformungen der Dachfläche ohne Zugbänder wären erheblich grösser. Jedes Hängeband ist deshalb durch ein horizontales Zugband ausgesteift. Dieses Zugband erhält nur geringe Kräfte, so dass sein Querschnitt sehr klein sein kann (Bild 18). Durch eine entsprechend hohe Vorspannung wird es in die Lage versetzt, auch Druckkräfte durch Abbau der Zugvorspannung aufzunehmen.

Die Wirkung des Zugbandes beruht darauf, dass an den Verbindungsstellen von Bogen und Zugband die Horizontalverschiebung des Bogens weitgehend verhindert wird. Dadurch ist die kinematische Verschieblichkeit stark eingeschränkt. Das Band ist am wirksamsten, wenn es etwa in den Viertelpunkten der Spannweite den Bogen durchdringt, weil dort die Horizontalverschiebungen am grössten sind. Wirkungsweise und Wirksamkeit des Zugbandes sind in [2] beschrieben. Das Problem muss geometrisch nichtlinear behandelt werden (Theorie 3. Ordnung), weil sich bei lotrechten Verschiebungen von mehr als 1% der Spannweite die nichtlinearen Geometrieglieder stark bemerkbar machen.

Die gesamte Dachfläche besteht aus Leichtbeton LB 300, der in Bogenrichtung vorgespannt ist. Die Hängebänder sind in den Tiefpunkten durch Rinnenträger zusammengefassst und zusätzlich miteinander durch Versteifungsträger verbun-

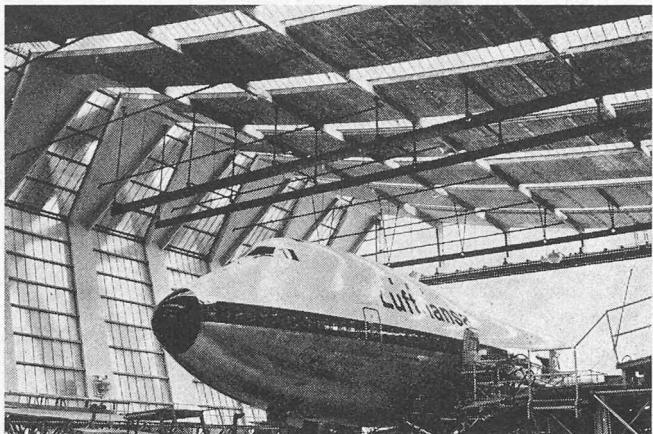


Bild 19. Wartungshalle V, Frankfurt, Halleninnenraum. Links: die Hallenseite der Verankerungsböcke, oben: die Gliederung der Dachfläche in Lichtbänder und Hängebänder mit Versteifungsträgern und Zugbändern. Die Stahlkonstruktion ist eine der Bahnen für den Hängekran

den (Bilder 19 und 20). Die starke Profilierung gibt der Fläche begrenzte Biegesteifigkeit, die wegen des Betriebs von Hängekranen gebraucht wird und weil die Sogspitzen des Windes mit  $320 \text{ kp/m}^2$  örtlich das Dachgewicht von  $245 \text{ kp/m}^2$  erheblich übersteigen. Das tote Gewicht ist deshalb für die Bogenrichtung mit 45% verhältnismässig hoch. Insgesamt wiegt die Dachkonstruktion  $195 \text{ kp/m}^2$ . Das sind umgerechnet 11 cm Leichtbeton. Nehmen wir diese 11 cm als Bogendicke, so ist bei 210 m mittlerem Bogenradius das Verhältnis von Dicke zu Radius 1:2000. Demgegenüber hat die Schale eines Hühner-*eis*, das wir als Konstruktion der Natur bewundern, das Verhältnis 1:75. Die gesamte Baumasse der Dachfläche ergibt also nur den 27. Teil der Dicke einer Eischale. Beim Bogenfaltwerk der Paketumschlaghalle mit 100 m mittlerem Bogenradius ist es immerhin bereits der 5. Teil. Wir dürfen bei solchen Vergleichen natürlich nicht übersehen, dass Hallenkonstruktionen und Eischalen ganz unterschiedlichen Funktionen dienen.

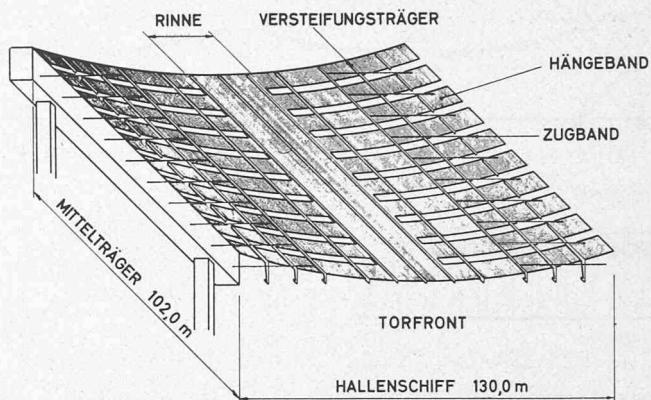


Bild 20. Wartungshalle V, Frankfurt. Konstruktionsschema der Dachfläche eines Hallenschiffs

Das Bauverfahren ist im Grunde vorgezeichnet durch das Aufteilen der Konstruktion in 10 für sich standfeste Zugbogensysteme, die jeweils aus einem zweischiffigen Hängeband mit Mittelunterstützung und zwei Verankerungsböcken bestehen. 10 Hängebänder ergaben für die Dachfläche 10 aufeinanderfolgende Bauabschnitte und damit 10maligen Gerüst-einsatz (Bild 21). Das Zurückführen der Hallenkonstruktion auf wenige Tragglieder, die mit Ausnahme des Mittelrahmens mehrfach vorkommen, liess abschnittsweise Arbeiten sinnvoll zu. Da sich gleiche Arbeitsgänge mehrfach wiederholten, konnten die Arbeitsgruppen am ganzen Bau gut vorgeplant mit hoher Leistung eingesetzt werden. Das ergab kurze Bauzeiten und kommt darüber hinaus der Wirtschaftlichkeit und der Qualität des Bauwerks zugute. Auch die Stützkonstruktionen, Verankerungsböcke und Mittelrahmen wurden nicht als Ganzes betoniert, sondern waren in einzelne Bauabschnitte unterteilt. Die aussergewöhnlichen Abmessungen der Bauglieder dieses Zugbogensystems und ihre grossen Kräfte führten zu einer reinen Ortbetonlösung.

#### Literaturverzeichnis

- [1] H. Bomhard, J. Sparber: Der felsverankerte Spannleichtbeton-Kragarm der Skiflugschanze Oberstdorf und Betrachtungen zur Anwendbarkeit und Beanspruchbarkeit von Konstruktionsleichtbeton. «Beton- und Stahlbetonbau 1973», Heft 5, Seite 107.
- [2] H. Bomhard: Versagensformen und -grössen der Bogen des Hallenbaus. Beiträge zur Arbeitstagung Sicherheit von Betonbauten, Berlin 7./8. Mai 1973, Seite 341. Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein e. V.
- [3] H. Bomhard: Ein baustatisches Verfahren zur Bestimmung der Traglasten ebener Druckbogen. Symposium Bemessung und Sicherheit von Stahlbeton-Druckgliedern, IVBH, Quebec 1974, Vorbericht, Seite 323.
- [4] H. Bomhard: Konstruktion und Bau der Paketumschlaghalle in München. Deutscher Betontag 1967, Vorträge, Seite 121. Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein e. V.
- [5] H. Bomhard: Onderhoudshangar V op de luchthaven Frankfurt am Main. Cement XXIV (1972), Heft 3, Seite 83.
- [6] H. Bomhard: Hängedächer in Dywidag-Spannbeton, insbesondere das Dach des Auditoriums der Escuela Normal in Jalapa, Mexiko. Dywidag-Berichte 5-1966.
- [7] R. Thon, H. Bomhard: Konstruktion und Bau der Wartungshalle V auf dem Flughafen Frankfurt am Main. «Beton- und Stahlbetonbau» 1970, Heft 5, Seite 121.
- [8] E. Grasser: Biegebemessung von Stahlleichtbeton. Deutscher Betontag 1975, Vorträge, Seite 345. Wiesbaden: Deutscher Betonverein e. V.
- [9] K. Bomhard: Über das Leistungsvermögen von Tragwerken am Beispiel von Balken, Druckbogen und Zugbogen. IVBH, 10. Kongress, Tokio 1976, Vorbericht, Seite 133.

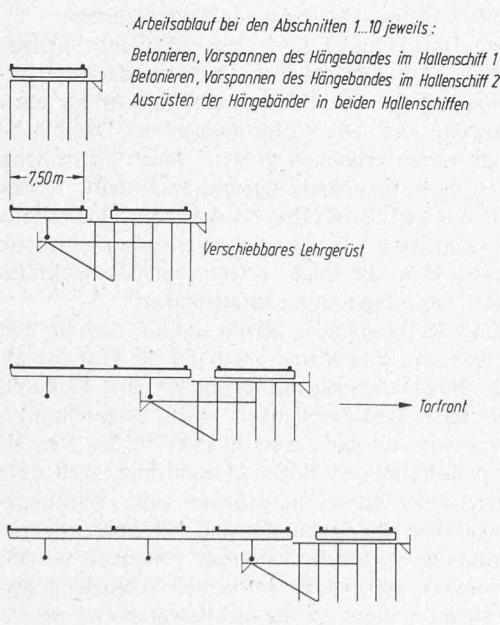


Bild 21. Wartungshalle V, Frankfurt, Schema der Dachfläche in 10 Bauabschnitten