Weitgespannte Sandwichkuppel im Werkstoffverbundsystem Stahlfeinblech - Polyurethanschaum

Autor(en): **Jungbluth, Otto**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-9597

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Weitgespannte Sandwichkuppel im Werkstoffverbundsystem Stahlfeinblech-Polyurethanschaum

Large Span Sandwich Dome in Composite Material System of Thin Steel Plate and Polyurethan Solid Foam

Coupole de grande portée en construction sandwich tôle d'acier – mousse de polyuréthane

OTTO JUNGBLUTH
Professor Dr.-Ing.
Bochum, BRD

1. Leichte Flächentragwerke

Bei Flächentragwerken des konstruktiven Ingenieurbaus wird das Verhältnis Konstruktions-Eigengewicht zur Gesamtbelastung mit wachsender Spannweite immer ungünstiger. Um den Nachteil des hohen Konstruktionseigengewichtes bei weitgespannten Flächentragwerken zu vermeiden, verfolgt man neuerdings zwei Wege:

1. Auflösung des Flächentragwerks in zugbeanspruchte Seil- und Seilnetztragwerke
2. Flächentragwerke aus leichten Werkstoffen, z. B. verstärkten Kunststoffen.

Der erste Weg hat den Nachteil, daß das Seilwerk - weil im engeren Sinn eigentlich kein Flächentragwerk - doch zusätzlich mit kleineren Flächenträgern eingedeckt werden muß, und daß der konstruktive Aufwand des Verbundes zwischen Seilwerk und Dachhaut hohe Kosten verursacht.

Der zweite Weg der ausschließlichen Verwendung von Kunststoffen läßt trotz der möglichen Verstärkung mit Fasereinlagen wegen der ungünstig wirkenden Langzeitbeanspruchung keine großen Spannweiten zu. Außerdem ist das zusätzliche Aufbringen von Dämmschichten schwierig und wirtschaftlich kaum vertretbar.

Deshalb verfolgt der Verfasser seit über 10 Jahren einen dritten Weg, nämlich das Ausnützen des günstigen Festigkeits-Gewichts-Verhältnisses von Stahlfeinblechdeckschichten und deren Stabilisierung durch eine gleichzeitig als Wärmedämmung wirkende Kunststoff-Kernschicht. [1]

Über das günstige Tragverhalten von Sandwichflächentragwerken des Werkstoff-Verbundsystems Stahlfeinblech-Polyurethanhartschaum und über die Planung einer 45 m weit gespannten Sandwichkuppel wurde bereits während des VIII. Kongresses in New York 1968 berichtet. [2]

Inzwischen wurde diese Kuppel ausgeführt und im Jahre 1970 der Fachwelt vorgestellt.

2. Werkstoffverbundsystem Stahl/Polyurethan

Der Grund, daß Stahlbleche trotz ihrer hohen Festigkeit bisher nur in wenigen Fällen - eigentlich nur in zwei - als Flächentragwerke eingesetzt wurden, nämlich als Tankdächer im Behälterbau und als Stahlfahrbahn im Großbrückenbau, liegt in der aufwendigen Aussteifung gegen Instabilitäten. So beträgt der Gewichtsauf-

wand für Steifen im Verhältnis zum Blech

im Brückenbau ca. 25 - 30 %
im Behälterbau ca. 30 - 40 %

Der Ersatz der diskontinuierlichen Steifen durch die kontinuierliche Bettung des Bleches mit Hilfe der Dämmschicht und die Verwendung des selbstklebenden, selbstreagierenden Polyurethan-Gemisches als Hartschaum-Stützschicht sind als der entscheidende Durchbruch zu einer wirtschaftlichen Sandwich-Flächentragwerk technik im Hochbau anzusehen. [3]

Die erfolgreiche und sichere Anwendung des Sandwichsystems Stahl/Polyuretha (FEPUR) ist aber an eine entscheidende Bedingung, die nicht unbedingt eine Einschränkung bedeuten muß, gebunden. Auch Polyurethanhartschaum ist als Kunststoff eine organische Substanz, die bei entsprechend hoher Langzeitbeanspruchung zum Kriechen neigt. Es ist deshalb wichtig, zwei Wirkungen der Sandwichkernschicht zu unterscheiden:

1. für ebene Sandwichflächentragwerke vorzugsweise eine Schubübertragung zwischen den beiden Deckschichten,
2. für profilierte und gewölbte Sandwichflächentragwerke vorwiegend eine Stabilisierung der beiden Deckschichten.

Wie auch Versuche inzwischen bestätigt haben, ist die abträgliche Kriechneigung des Polyurethan-Hartschaums bei Langzeitbeanspruchung nur im ersten Fall zu beobachten. Deshalb kommen ebene FEPUR-Sandwichflächentragwerke nur für gering beanspruchte Wandelemente, z. B. für Hallenbeplankungen, in Frage. Für höher beanspruchte Dachtragwerke kann die Kriechneigung des Kunststoffschaums durch eine Konstruktionsform nach Fall 2 ausgeschlossen werden.

Um die Vermeidung der Kriechwirkung bei profilierten und gewölbten Sandwich Flächentragwerken im praktischen Langzeit-Großversuch zu beweisen, wurde die Sandwichkuppel Hannover nach Vorschlag des Verfassers von den Firmen Hoesch (Stahl) und Bayer (Polyurethan) errichtet.

Als Werkstoffe wurden verwendet:

Stahlfeinblech der Güte St 37 mit einer Streckgrenze σ_s = 24 kp/mm^2, 25 μ feuerverzinkt und kunststoffbeschichtet

Polyurethan mit den Komponenten des Schäumgemisches:

a)	Polyol FWFA (Bayer)	100 Gew. teile
b)	Polyol TM (Bayer)	1 " "
c)	Isocyanat 44 V (Bayer)	105 " "
d)	Aktivator Desmorapid PP (Bayer)	2 " "
e)	Treibmittel R 11 (Kali-Chemie) Fluortrichlormethan	30 " "

Sowohl aus freigeschäumtem Material als auch aus Versuchs-Sandwichelemente wurden Probekörper entnommen, deren Prüfung folgende Werkstoffkennwerte ergal

Raumgewicht	78 kg/m^3	Würfel 10/10/10 cm
"	81 "	" 5/ 5/ 5 cm
Druckstabilität	5,1 "	" 5/ 5/ 5 cm
Zerreißfestigkeit	5,5 "	" 10/10/10 cm

Konturänderung bei 80°C 3 Stunden	0,0 %	Würfel 10/10/10 cm
Konturänderung bei -20°C 3 Stunden	0,0 %	" 10/10/10 cm

Die Haftfestigkeit des PU-Schaums am Stahlblech muß so groß sein, daß bei Zerreißversuchen an Probekörpern der Bruch im Schaumkern und nicht in der Haftfuge erfolgt.

3. Konstruktion

Das Kuppeltragwerk hat die in Bild 1 dargestellten Abmessungen. Die Kugel-

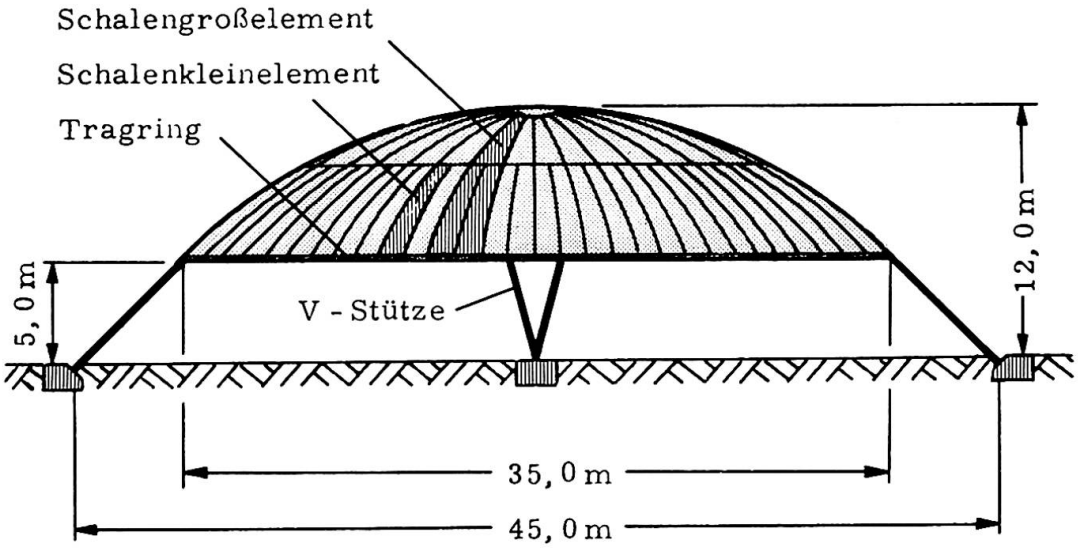
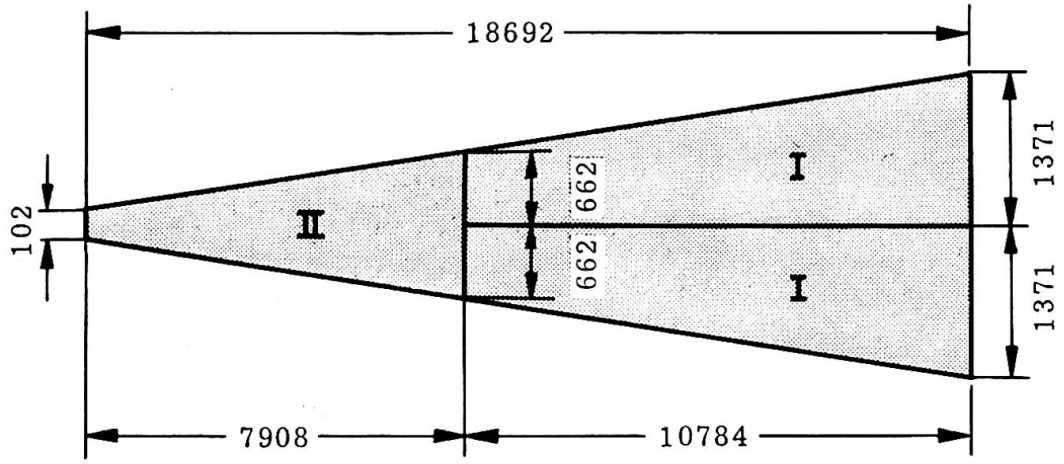


Bild 1

schale mit einem Krümmungsradius R = 24,7 m in Meridianrichtung besteht aus 40 Großsegmenten von je 18,69 m Länge und einer Basisbreite von 2,74 m am Fußring (Bild 2). Aus fertigungstechnischen Gründen sind die Großsegmente nur einfach, und zwar in Meridianrichtung gekrümmt.



Maße in mm

Bild 2

Die Gesamtdicke des Sandwich-Querschnitts beträgt 150 mm (Bild 3), die Stahldeckschichten sind je 1 mm dick und wurden nur an den Lasteinleitungsstellen der

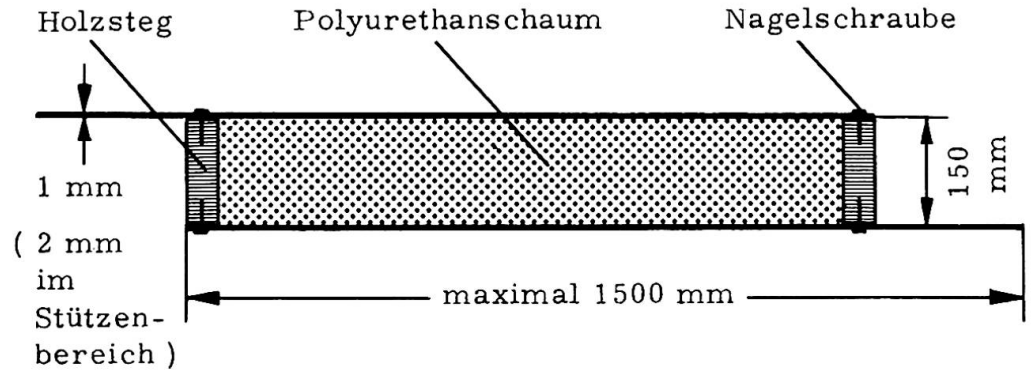
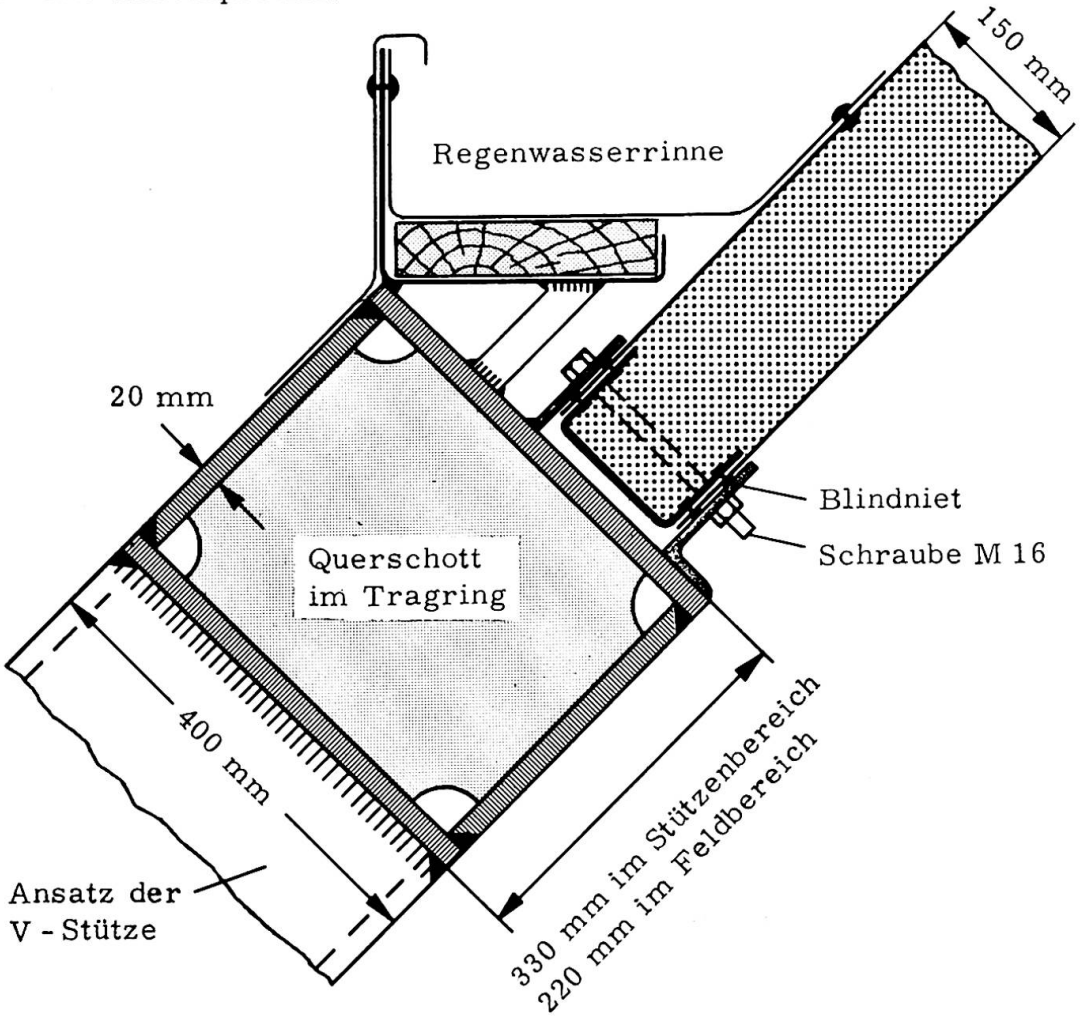


Bild 3

Stützen auf 2 mm verstärkt. Da Stahlfeinblech in der gewählten Segment-Basisbreite nicht hergestellt wird, und da das Ausschäumen so großer Elemente in einer fast 19 m langen Form zu schwierig geworden wäre, wurde das Segment für die Herstellung nochmals in drei Schalenkleinelemente (Bild 2) unterteilt. Die seitlichen Längsränder wurden durch Holzstege abgeschottet, wobei der eine Längsrand jedes Deckblechs zur Schaffung einer Überlappverbindung um je 145 mm überstand. Die Verbindung der Stahlbleche mit den Holzstegen erfolgte mit Nagelschrauben, die Überlappverbindung von Deckblech zu Deckblech mit Blindnieten 4,8 mm ϕ. Der Abstand der Nagelschrauben variiert zwischen 70 mm im unteren und 180 mm im oberen Bereich der Kuppel.

Der Fußring, der die 40 Sandwichgroßsegmente an der Basis aufzunehmen hat, ist ein regelmäßiges Vierzigeck mit Kastenquerschnitt (Bild 4). Die vier V-Stützen sind ebenfalls Kastenprofile.



Ein Schalengroßsegment wiegt einschließlich der Verbindungsfugen 1045 kp, also rund 1 to. Die Leistungsfähigkeit des Werkstoffverbundsystems Stahl/Polyurethan wird am besten aus dem folgenden Vergleich von Kuppeln etwa gleicher Spannweite, aber aus verschiedenen Baustoffen und nach verschiedenen Bauweisen deutlich:

	Eigengewicht
Kuppel Petersdon Rom	$g = 2600\ kp/m^2$
Stahlbetonkuppel	$g = ca.\ 200\ kp/m^2$
Sandwichkuppel Hannover	$g = 30\ kp/m^2$

Hierbei ist noch zu beachten, daß in diesem geringen Gewicht des Sandwichtragwerks noch das Eigengewicht der Wärmedämmung des von keinem anderen Dämmwerkstoff übertroffenen Polyurethans ($\lambda = 0,002$ kcal/m h C°) enthalten ist und der Witterungsschutz durch die Kunststoffbeschichtung des Stahlblechs.

Neben der hervorragenden Tragwirkung schließt das Sandwichsystem Stahl/Polyurethan (FEPUR) also noch die notwendigen bauphysikalischen Eigenschaften Wärmedämmung, Witterungsschutz und Dampfsperre sozusagen systemimmanent ein.

4. Berechnung

Der Berechnung lagen folgende Lastannahmen zu Grunde:

a) Eigengewicht

2 Stahlbleche à 1 mm:	$g = 2 \cdot 7,85 =$	$15,7\ kp/m^2$
15 cm Polyurethanschaum: ($\gamma = 80\ kp/m^3$)	$g = 80 \cdot 0,15 =$	$12,0\ kp/m^2$
Holz-Randstege	$g =$	$\sim 3\ kp/m^2$
	$g \approx$	$30\ kp/m^2$

b) Schnee

Vollast	$p_s = 70\ kp/m^2$
halbseitige Last	$p_s = 50\ kp/m^2$

c) Wind

Symmetrischer Sog	$p_w = -95\ kp/m^2$
Antimetrischer Windanteil	$p_w = +50\ kp/m^2$

Die Druck- und Sogverteilung der Windlasten wurde auf Grund von Windkanalversuchen am offenen und geschlossenen Modell ermittelt.

Die Standsicherheitsnachweise hatten folgendes Ergebnis:

4.1 Spannungsnachweis:

Die größte Spannung in den Stahldeckblechen der Sandwichschale im Bereich des Fußrings betrug:

$$\sigma_{max} = \pm 509\ kp/cm^2$$

4.2 Stabilitätsnachweis Knittern der Deckschichten:

Nach [1] und [5] gilt:

$$\sigma_{Ki} = 0{,}8 \cdot \sqrt[3]{E^D E^K G^K}$$

$$= 0{,}8 \cdot \sqrt[3]{2{,}1\ 10^6\ 70\ 30}$$

$$= 1300\ \text{kp/cm}^2$$

Fordert man eine zweifache Sicherheit, so ist eine Spannung von σ = 650 kp/cm^2 für die Deckbleche zulässig. Im vorliegenden Fall wirkt sich außerdem noch die Zugspannung des zweiachsigen Spannungszustandes günstig, d.h. stabilisierend aus.

4.3 Nachweis der Gesamtstabilität

Bei der stark gewölbten Kuppel war ein Durchschlagen nicht zu erwarten, das ergaben auch die beiden Nachweise

a) nach [4]

$$p_D = c \cdot E \left(\frac{\delta}{R}\right)^2 = 3{,}77\ M_p/m^2$$

mit $p_{vorh} = 0{,}108$ wird

$$\nu_D = \frac{3{,}77}{0{,}108} = 35$$

b) nach [5] für weiche Kerne:

$$\nu_D = \frac{2\,S}{R} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 1500}{24{,}70} = 4{,}05$$

$$\nu_D = \frac{4{,}05}{0{,}108} \quad 40$$

5. Fertigung und Montage

Für die Fertigung der Sandwich-Schalenkleinelemente wurden zur abwechselnden Betriebsweise zwei gleiche Schäumvorrichtungen (Bild 5) gebaut, die so ausgelegt waren, daß sie den auftretenden Schäumdruck von etwa p = 2 kp/cm^2 aufnehmen konnten. Die zugeschnittenen verzinkten und kunststoffbeschichteten Stahlfeinbleche wurden in die Schäumform eingelegt und an den Rändern mit den Holzstegen durch die Nagelschrauben verbunden, so daß nach Schließen der Deckelteile der Schäumform ein allseits geschlossener Hohlraum entstand, in den bei den oberen Schalenkleinelementen (Typ I) durch ein und bei den unteren (Typ II) durch zwei Einfüll-Löcher das Polyurethankomponentengemisch eingespritzt werden konnte. Die Schäummaschine HK 1000 hat eine maximale Austrittsleistung von 190 kg/min. Für das größere untere Schalenkleinelement (Typ II) mit einem Schaumkernvolumen von 1,46 m^3 betrug bei einer Austrittsleistung von 2,6 kg/sec die eingeschossene Menge 120 kg bei einer Einschußzeit von 46 Sekunden. Für das kleinere Firstschalenelement mit 0,72 m^3 Volumen wurde die erforderliche Menge des Polyurethangemisches von 60 kg in 23 Sekunden eingespritzt. Bei dem im Hinblick auf eine gleich-

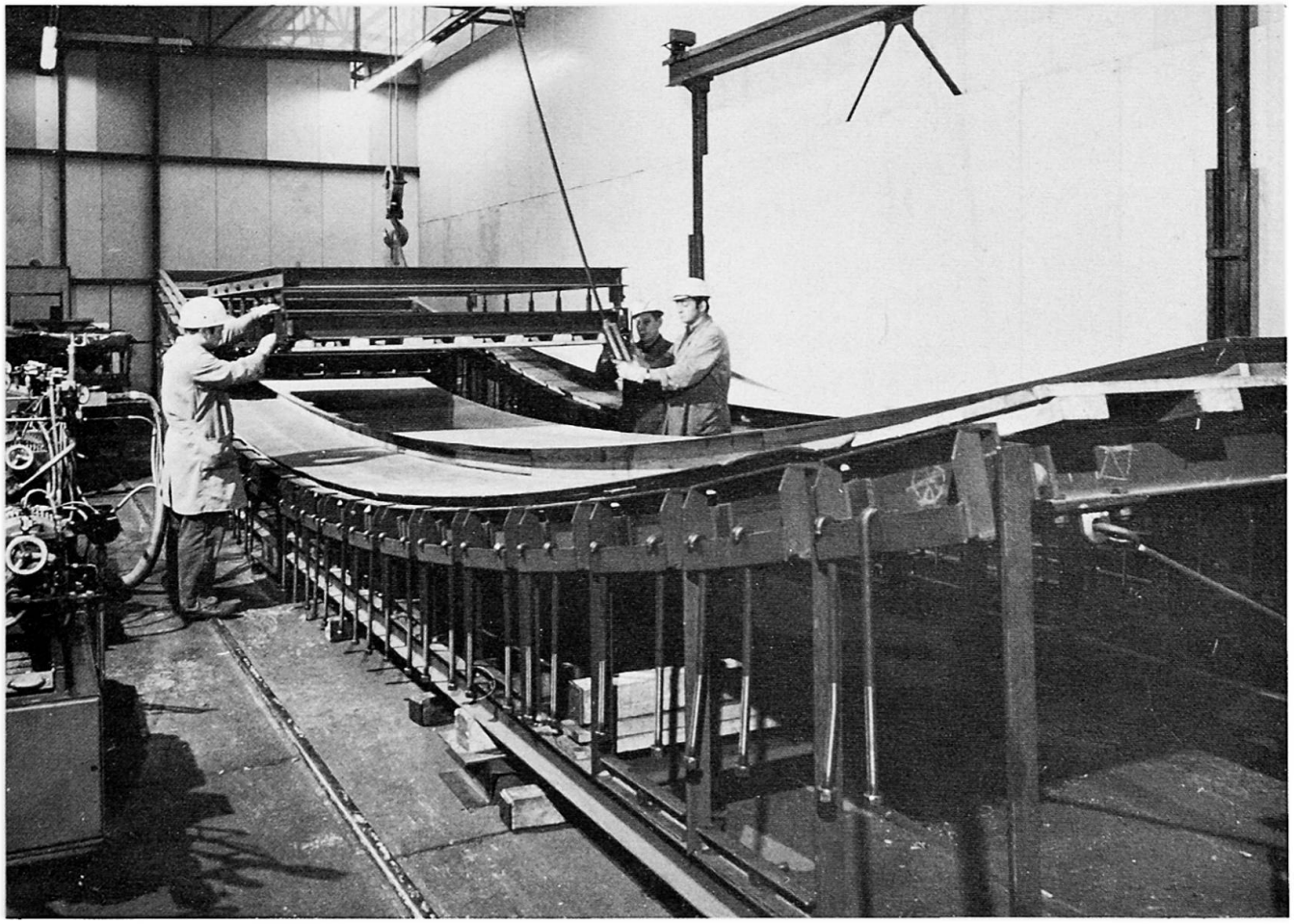


Bild 5

mäßige Schaumstruktur gewählten Verdichtungsgrad von 1:2, d.h. dem Verhältnis von freiverschäumtem zu formverschäumtem Raumgewicht, baute sich ein Schäumdruck von ca. 2 kp/cm^2 auf. Die Aushärtezeit betrug in Anbetracht des großen Schaumvolumens und im Hinblick auf die noch geringen Erfahrungen bei der erstmalig in dieser Größe für "tragende Bauteile" angewandten FEPUR-Sandwichtechnik 3-5 Stunden. Auf Grund der gewonnenen Erfahrungen kann aber angenommen werden, daß bei so großen FEPUR-Sandwichelementen die Ausschalzeit auf 1-2 Stunden gesenkt werden kann. Die in einer Versuchswerkstätte der Hoesch AG in Dortmund hergestellten Schalenkleinelemente wurden auf Tiefladern zur Baustelle der Messe Hannover gebracht, wo jeweils drei (Bild 2) in einer Halle zu einem Großsegment zusammengebaut wurden.

Zur Montage wurde zunächst ein Stahlrohr-Lehrgerüst errichtet und darauf die acht Teilstücke des Fußrings montiert und verschweißt, so daß anschließend die vier V-Stützen mit dem Fußring verschweißt werden konnten.

Die vierzig vormontierten Sandwich-Großsegmente von etwa 19 m Länge, 3 m Fußbreite und ca. 1 to Gewicht wurden mit einem Autokran auf den Fußring und das Lehrgerüst aufgelegt (Bild 6). Nach dem Ausrichten wurden die überlappenden Deckbleche mit Blindnieten und die Sandwich-Großelemente mit dem Fußring durch 5 Schrauben M 16 verbunden (Bild 7).

Die Meridianfugen der Großsegmente, die auch die Toleranzen aufzunehmen hatten und auf Grund der Kugelgeometrie zwischen 20 mm am oberen Ende - 85 mm in halber Höhe - und 20 mm am unteren Ende variieren, wurden anschließend mit einer kleineren Baustellenschäummaschine ausgeschäumt. Obwohl das Fugenschäu-

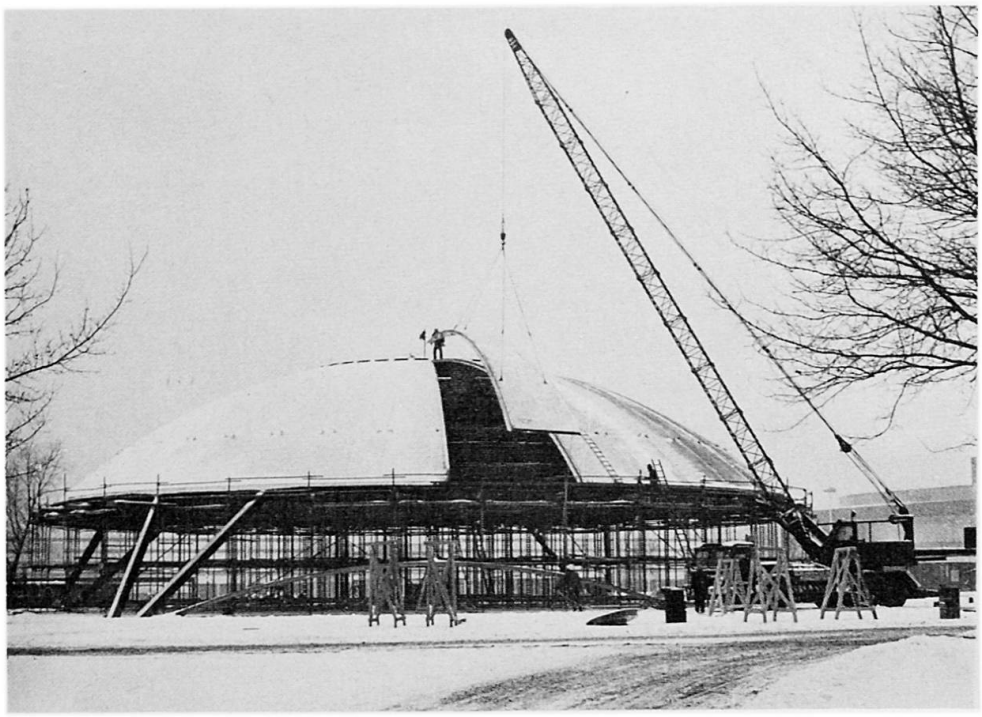


Bild 6

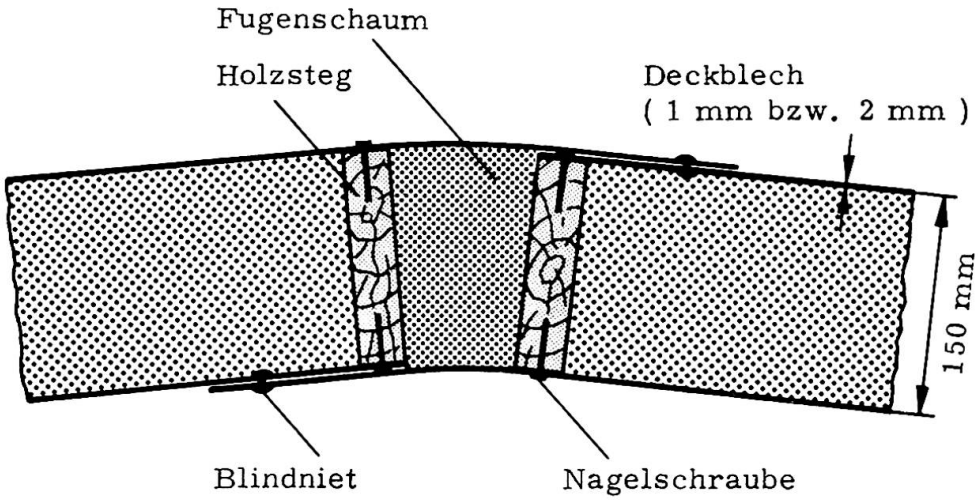


Bild 7

men im Winter durchgeführt wurde, konnte von der zunächst vorsichtshalber vorgesehenen Erwärmung der Fugen durch elektrische Heizmatten abgesehen werden, da sich zeigte, daß auch ohne diese Maßnahmen ein einwandfreier Haftverbund erreicht wurde.

Nach dem Ausschäumen der Fugen wurden Kuppel und Fußring vom Lehrgerüst freigesetzt (Bild 8).

Bild 8

6. Ausblick

Daß diese wohl erstmalig für eine "tragende Konstruktion" und noch dazu mit einer so großen Spannweite von 45 m errichtete Sandwichkugelschale aus 1 mm dickem Stahlblech und 150 mm dickem Polyurethan-Schaumkern eine sehr große Steifigkeit erzielte, zeigte sich bereits nach dem Freisetzen vom Montagegerüst, als eine Mittendurchsenkung von nur 5 mm gemessen wurde.

Aber würde diese Steifigkeit auch langfristig erhalten bleiben oder würden sich das Langzeitverhalten nachteilig beeinflussende Deformationen infolge Kriechen des Schaumkerns ergeben?

Seit der Nullmessung auf dem starren Gerüst am 10. 2. 1970 wurden bisher über einen Zeitraum von etwa 1 1/2 Jahren 20 über die Sandwichkugelschale verteilte Zielpunkte geodätisch vermessen. Die Verformungen der einzelnen zwanzig verteilten Meßpunkte liegen im Bereich weniger Millimeter oder Zehntelmillimeter. Unter ihnen haben einige der Meßpunkte infolge der Temperaturänderung der Jahreszeiten positive und negative Vorzeichen.

Ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses betrug die Höhenverschiebung des Kugelpols

	Durchsenkung	Differenz
10. 2. 70 (Nullmessung auf starrer Lagerung)	0	
		- 4,8
13. 2. 70	- 4,8	
		- 1,2
27. 2. 70	- 6,0	
		- 1,4
14. 5. 70	- 7,4	
		+ 2,3
26. 5. 71	- 5,1	

Dieses günstige Langzeitverhalten läßt erwarten, daß das neuartige Werkstoffverbundsystem Stahl/Polyurethan (FEPUR) im Konstruktionssystem der Sandwichtechnik zur Grundlage einer neuen Tragwerkstechnologie des konstruktiven Ingenieur-

baus werden wird. Voraussetzung ist allerdings, daß die Konstruktionsformen in Anpassung an dieses Werkstoffverbundsystem gestaltet werden.

Über bereits in der Entwicklung befindliche FEPUR-Sandwichbauteile für ein Fertigteilsystem und deren kontinuierlich-verfahrenstechnische Herstellung auf einer automatisierten Fertigungslinie wird zu gegebener Zeit berichtet.

Literaturhinweise

1 O. Jungbluth/H. Witte

"Das Verbundsystem Stahl/Kunststoff in der Sandwichtechnik"
HOESCH-Berichte aus Forschung und Entwicklung 3/68

2 O. Jungbluth

"Sandwichflächentragwerke im Stahlbau"
IVBH VIII. Kongreß New York, Schlußbericht Seite 333 - 343

3 O. Jungbluth

"Sandwichflächentragwerke im konstruktiven Ingenieurbau"
Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Düsseldorf, Vortrag N 208

4 K. Klöppel/O. Jungbluth

"Beitrag zum Durchschlagproblem dünnwandiger Kugelschalen. (Versuche und Bemessungsformeln"
DER STAHLBAU 1953, Seite 121-130

5 F.J. Plantema

"Sandwich Construction"
John Wiley Inc. New York, London, Sidney 1966

Zusammenfassung

Es wird die Konstruktion, Herstellung und Montage einer 45 m weitgespannten Sandwichkugelschale aus dem Werkstoff-Verbundsystem Stahl/Polyurethan beschrieben.
Das bisher über eineinhalb Jahre verfolgte günstige Langzeitverhalten der Sandwichkuppel läßt erwarten, daß dieser Werkstoffverbund von Stahl und Kunststoff in der Konstruktionsform der Sandwichtechnik eine neue leistungsfähige und wirtschaftliche Leichtbau-Tragwerkstechnologie begründet.