

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

Band: 8 (1968)

Artikel: Sandwich-Flächentragwerke im Stahlbau

Autor: Jungbluth, Otto

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-8765>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

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

Sandwich-Flächentragwerke im Stahlbau

Sandwich Sheet Supporting Structures

Eléments de support sandwich pour la construction métallique

OTTO JUNGBLUTH
Dr.-Ing., Dortmund

Es ist für die moderne Technik kennzeichnend, daß die Anforderungen an die Werkstoffe hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit, Temperaturbeanspruchung, Ermüdungsverhalten, Korrosion, Verarbeitbarkeit usw. in stärkerem Maße steigen als die Gebrauchseigenschaften der Naturwerkstoffe und ihrer Mischsysteme wie z. B. Legierungen bei Metallen und Copolymerisate bei Kunststoffen verbessert werden. Um die Forderung nach vielfacher Kombination der Eigenschaften zu erfüllen, bemüht man sich, die Werkstoffe nicht nur molekular zu mischen, sondern zu Verbundsystemen und speziell zu Sandwichsystemen zu paaren.

Werden für zweidimensionale Tragsysteme Grob-, Mittel- und Feinbleche aus Stahl verwendet, dann ist die Dicke im Verhältnis zur Flächenausdehnung meist so gering, daß stählerne Flächentragwerke zusätzlich versteift werden müssen (Bild 1). Zu den im Stahlbau üblichen 3 Versteifungsarten von Stahlblechen

- das Krümmen zu Schalen
- das Profilieren der Gesamtfläche
- das Anfügen von Einzelrippen

soll also eine 4. Versteifungstechnik treten:

- das Zusammenfügen zur Sandwichbauweise.

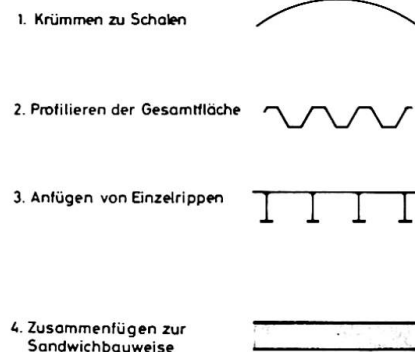


Bild 1: Versteifungsarten von Stahlblechen

Ein Sandwichflächentragwerk besteht aus mehreren im Verbund wirkenden Schichten (Bild 2), vorzugsweise aus zwei symmetrischen oder unsymmetrischen Deckschichten und einer dazwischen angeordneten Kernschicht, wobei man nach der Theorie dicke und dünne Deckschichten mit jeweils steifen und leichten Kernschichten unterscheidet. Ferner können die Deck- und Kernschichten mit gerichteten oder mit nicht gerichteten Eigenschaften ausgebildet sein und aus dem gleichen Material oder aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen. Es sind also bezüglich des Werkstoffs homogene und inhomogene sowie hinsichtlich der Steifigkeit isotrope und auch orthogonal-anisotrope Sandwichsysteme möglich. Sandwichtragwerke sind also Verbund-Flächentragwerke, d. h. die Sandwichtechnik ist anwendbar bei Platten, Scheiben, Schalen und Faltwerken.

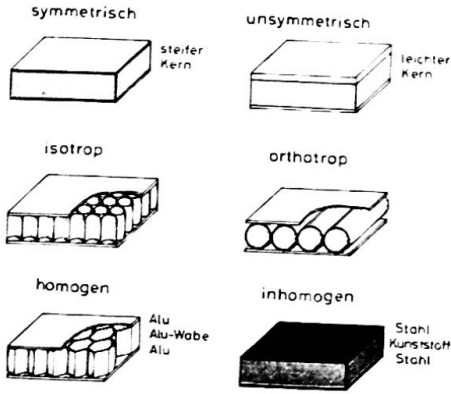


Bild 2: Sandwichsysteme

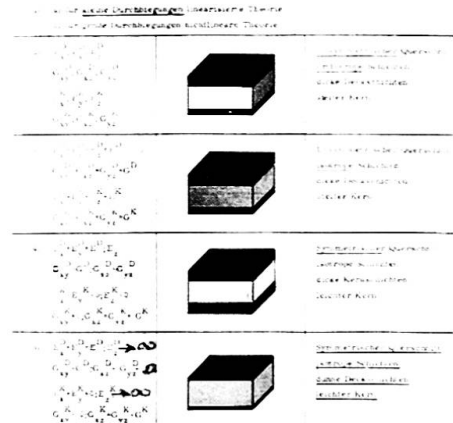


Bild 3: Physikalische Voraussetzungen der Sandwich-Plattentheorie

Der rasche Fortschritt in Luft- und Raumfahrt hat für die Zellenentwicklung eine Fülle von Veröffentlichungen im internationalen Schrifttum ausgelöst. Die Sandwichtheorie (Bild 3) unterscheidet mehrere Fälle unterschiedlicher physikalischer Voraussetzungen.

Die mathematische Behandlung kann für sehr kleine Durchbiegungen mit Hilfe der linearisierten Theorie und für große Durchbiegungen mit der genauen nichtlinearen Theorie durchgeführt werden, bei der die exakten geometrischen Gleichungen in die Differentialbeziehungen eingehen.

Für kleine Durchbiegungen wird unter der Voraussetzung der Linearisierung das Biegeproblem einer dreischichten unsymmetrischen Sandwichplatte mit zwei dicken orthotropen Deckschichten und einer steifen orthotropen Kernschicht, also mit jeweils drei verschiedenen E-Moduli in jeder Ebene einer Schicht, nach Dundrová, Kovařík und Šlapák beschrieben durch die beiden simultanen Diff. - Gleichungen

$$\begin{aligned} (10) L \cdot \omega &= -p & (1) \\ (8) L^* \cdot \varphi &= q & (2), \end{aligned}$$

bei denen 17 unbekannte Funktionen, die von den Variablen x und y abhängen, durch eine allgemeine Verschiebungsfunktion ω und eine allgemeine Spannungsfunktion φ ersetzt werden. L und L^* sind umfangreiche lineare partielle Differential-Operatoren von 10. und 8. Ordnung.

Für symmetrische, isotrope Sandwichplatten mit dicken Deckschichten aber leichtem Kern vereinfacht sich das Problem wesentlich. Die getroffenen Voraussetzungen (Bild 3) für die Elastizitäts- und Schubmoduli bedeuten

für die Deckschichten, daß die Dehnungen und Verzerrungen senkrecht zur Plattenebene gegenüber denen des Kerns vernachlässigbar klein sind.

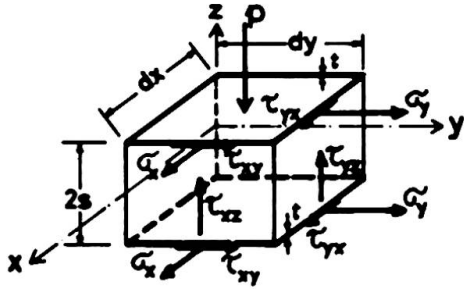
Für den Kern bedeuten sie, daß er keine Spannungen in der Plattenebene aufnimmt, sondern daß diese nur den Deckschichten zugeordnet sind.

Das Biegeproblem wird dann beschrieben durch die partielle Differential-

gleichung für die Mittelfläche des Kerns:

$$\Delta\Delta w = \underset{\substack{\text{Biege-} \\ \text{steifig-} \\ \text{keit}}}{K_1} p_K + \underset{\substack{\text{Schubstei-} \\ \text{figkeit}}}{K_2} \cdot \Delta p_K + \underset{\substack{\text{Dehnsteifig-} \\ \text{keit}}}{K_3} \cdot \Delta\Delta p_K \quad (3)$$

wobei Δ und $\Delta\Delta$ die Laplace'schen Operatoren 2. und 4. Ordnung darstellen.



Im Falle dünner Deckschichten mit leichtem Kern, wenn also ein Membranspannungszustand der Deckschichten angenommen werden kann, wird die gesamte Querkraft vom Kern aufgenommen (Bild 4). Für die Lösung dieses baupraktisch wichtigen Falles eignet sich gut das Ritz'sche Verfahren, das sich auf das Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie stützt. Dieses kann formuliert werden in dem Ausdruck:

$$\delta A_1 + \delta A_a = 0. \quad (4)$$

Bild 4: Spannungen am Sandwich-Plattenelement

Das Potential der inneren Kräfte in den Deckschichten ist:

$$A_i^D = \frac{1}{2} \int (\sigma_x \cdot \epsilon_x + \sigma_y \cdot \epsilon_y + \tau_{xy} \cdot \mu_{xy}) dV \quad (5)$$

und das Potential der äußeren Kräfte

$$A_a^D = - \iint p \bar{w} dx dy \quad (6)$$

Analog gilt für das Potential infolge der Schubverformung des Kerns:

$$A_i^K = \frac{1}{2} \int (\tau_{xz} \cdot \mu_{xz} + \tau_{yz} \cdot \mu_{yz}) dV \quad (7)$$

$$A_a^K = - \iint p \bar{w} dx dy \quad (8)$$

Mit den Hooke'schen Gleichungen und nach Ersetzen der Verzerrungen und Spannungen durch Verschiebungen in üblicher Weise nach der Plattentheorie erhält man mit $z = \pm s$ und $dV = 2t dx dy$ die Formänderungsarbeit der beiden Deckschichten:

$$A^D = \frac{E s^2 t}{1 - \mu^2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1 - \mu) \cdot \left[\right. \right.$$

$$\left[\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \iint dx dy - \iint p \bar{w} dx dy \quad (9)$$

und mit $dz = 2s$ die Formänderungsarbeit des Kerns

$$A^K = G^K \cdot s \iint \left[\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \iint p \bar{w} dx dy \quad (10)$$

Die Spannungen in den Deckschichten lauten:

$$\sigma_x = - \frac{z \cdot E^D}{1 - \mu^2} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_y = - \frac{z \cdot E^D}{1 - \mu^2} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \right) \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = - \frac{z \cdot E^D}{1 - \mu} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \quad (13)$$

und in der Kernschicht:

$$\tau_{xz} = G^K \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \quad (14)$$

$$\tau_{yz} = G^K \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \quad (15)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Verschiebungsanteil \bar{w} der Deckschichten und dem Anteil $\bar{\bar{w}}$ des Kerns wird hergestellt durch die Bedingung, daß in der Grenzzone zwischen Deckschicht und Kern Gleichgewicht zwischen der Schubspannung im Kern und der Spannungsänderung in der Deckschicht herrschen muß, also für:

$$z = +s: \quad \tau_{xz} = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \cdot t \quad (16)$$

$$\tau_{yz} = \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) \cdot t \quad (17)$$

Übergangs-

Diese ~~Rand~~bedingungen lassen sich in Verschiebungen ausdrücken:

$$-\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} = \frac{E^D \cdot s \cdot t}{G^K (1 - \mu^2)} \left(\frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial x \cdot \partial y^2} \right) \quad (18)$$

$$-\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} = \frac{E^D \cdot s \cdot t}{G^K (1 - \mu^2)} \left(\frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial x^2 \cdot \partial y} \right) \quad (19)$$

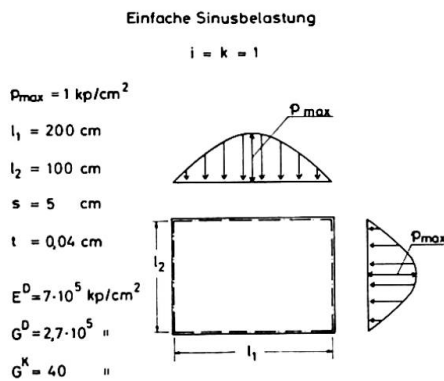
Zur Lösung der Aufgabe wählt man die beiden Ritz-Ansätze:

für die Deckschicht: $\bar{w} = \sum_{mn} a_{mn} \cdot f_{mn}(x, y)$ (20)

für die Kernschicht: $\bar{w} = \sum_{mn} b_{mn} \cdot g_{mn}(k, y)$ (21)

Das Minimum der potentiellen Energie verlangt, daß die Ableitungen der Potentiale nach den Koeffizienten a_{mn} und b_{mn} verschwinden, also

$$\frac{\partial A^D}{\partial a_{mn}} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial A^K}{\partial b_{mn}} = 0 \quad (22) \quad (23)$$



	Energiemethode	Linearisierte Diff. Gleichung	nicht lineare Theorie
w	2,466 cm +0,04%	2,467 cm +0,08%	2,465 cm
max σ	+1745 kp/cm ² -6,1 %	+1703 kp/cm ² -8,4 %	+1859 kp/cm ²
min σ	-1745 kp/cm ² +8,5 %	-1746 kp/cm ² +8,5 %	-1609 kp/cm ²

Bild 5: Zahlenbeispiel: einfache Sinusbelastung

Bild 6: Vergleich der Ergebnisse

Die recht gute Übereinstimmung der Näherung nach der Energiemethode mit den genaueren Lösungen der Diff. - Gleichung und der nichtlinearen Theorie (Bild 6) zeigt im Vergleich ein Zahlenbeispiel für einfache Sinusbelastung (Bild 5).

Wie sich in einer besonderen Untersuchung zeigen läßt, ist die Theorie brauchbar, wenn folgende Grenzen eingehalten werden:

$$\frac{2s}{t} \geq 100 \quad (24)$$

$$\frac{E^D}{E^K} \geq 5000 \quad (25)$$

$$\frac{1}{s} \geq 0,2 \sqrt{\frac{E^D}{E^K}} \quad (26)$$

Mit einem gewissen Vorbehalt wird man aber die auf der Grundlage der idealisierten Elastomechanik gewonnenen Ergebnisse der Sandwichtheorie werten und zur praktischen Nutzung experimentell modifizieren müssen, besonders, wenn Kern- oder Deckschichten aus einem Material bestehen, das nicht dem linearen Hooke'schen Elastizitätsgesetz gehorcht, wie z. B. Kunststoff (Bild 7). Polyurethan-Hartschaum für Kerne von Sandwichtragwerken zwischen Stahlblechen ist dennoch besonders geeignet wegen der für die Beanspruchungen des Hochbaus relativ hohen Tragfähigkeit, des geringen Gewichts und der hervorragenden Wärmedämmung, insbesondere aber wegen der direkten Verklebung mit den Stahldeckblechen. Werden die flüssigen Komponenten Polyol (Markenname Bayer: Desmophen) und Polyisocyanat (Desmodur) zusammen mit Fluortrichlormethan (Markenname Frigen von Hoechst) als Treibmittel und einem Aktivator genau dosiert zwischen die Stahlbleche eingespritzt, dann treibt nach wenigen Sekunden das Gemisch in einer exothermen

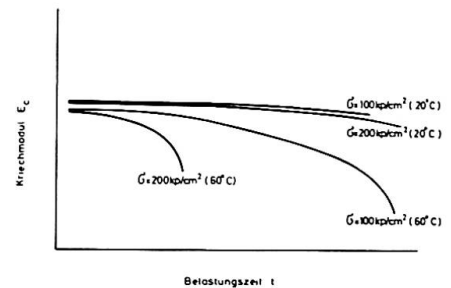


Bild 7: E-Modul-Kennfunktionen von Kunststoffen

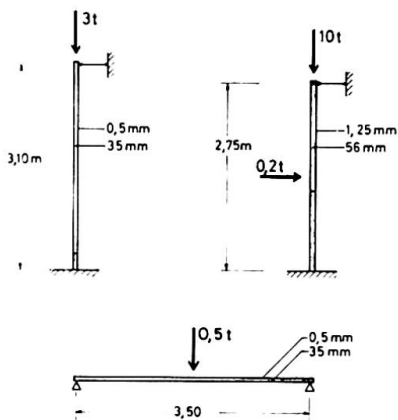


Bild 8: Sandwichtraglastversuche

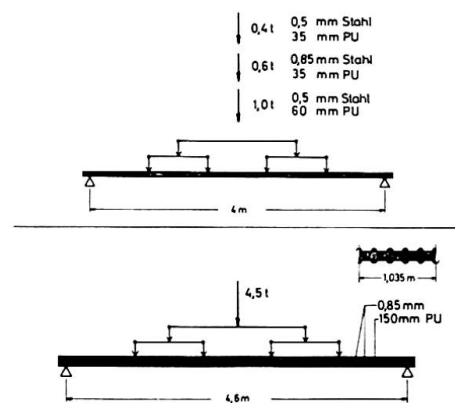


Bild 9: Sandwichtraglastversuche

Reaktion auf, und der Hartschaumkunststoff, dessen Raumgewicht etwa zwischen 50 und 200 kg/cbm variiert werden kann, verbindet sich schubfest mit den Stahldeckblechen. Versuche über Tragfähigkeiten von Stahl/Polyurethan-Sandwichflächentragwerken haben im Hinblick auf ihr geringes Eigengewicht

außerordentlich hohe Tragfähigkeiten ergeben (Bild 8 und 9). Bei der Variation der Dicke der Stahlblechdeckschichten und der Dicke des PU-Hartschaumkerns bestätigten die Versuche das zu erwartende Ergebnis, daß durch die Erhöhung der Kernschichtdicke höhere Traglasten erreicht werden als durch eine entsprechende Erhöhung der Deckschichtdicke. Darüber hinaus zeigt die Kostenrechnung für den Fall der höheren Traglast durch die vergleichsweise dickere Kunststoffkernschicht das wirtschaftlichere Ergebnis.

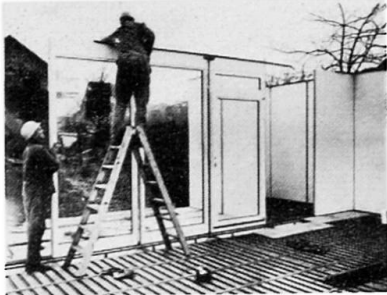


Bild 10: Stahl/PU-Sandwichwandtafeln

Zahlreiche Bauten sind bereits in Stahl/Polyurethan-Sandwichtechnik ausgeführt worden. Die tragenden Wandtafeln (Bild 10) des in Bild 11 gezeigten Hauses nehmen mit etwa 4facher Sicherheit alle den deutschen Hochbauvorschriften entsprechenden Eigengewichts-, Wind- und Schneelasten auf bei einer freien Spannweite des Daches von 10 m. Ein anderes Sandwichprodukt (Bild 12) aus beiderseits 0,5 mm dicken Stahlblechen mit 35 mm



Bild 11: Haus mit Sandwichwandtafeln



Bild 12: Stahl/PU-Sandwichwandtafeln für Industriehallen

oder 60 mm dicken Polyurethankernen mit Nut- und Federverbindung für die Beplankung von Industriehallen wird vollkontinuierlich im Plattenband mit einer

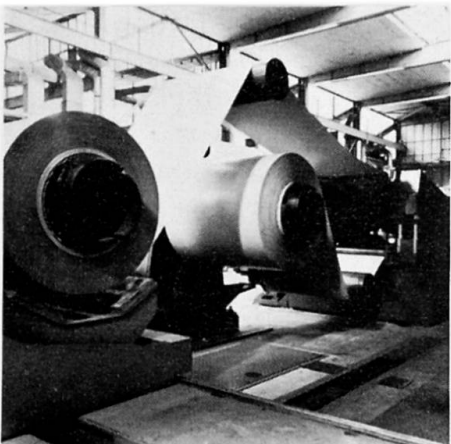


Bild 13: Stahl/PU-Sandwichkontinlinie

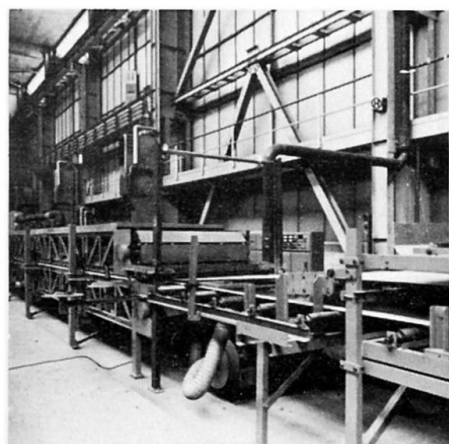


Bild 14: Stahl/PU-Sandwichkontinlinie

Geschwindigkeit von 3 - 5 m pro Minute hergestellt (Bild 13 und 14). Neu entwickelte Sandwich-Trapezprofilplatten (Bild 15 und 16) kombinieren die Profil-

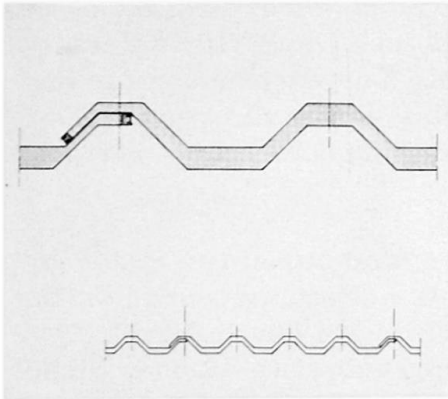


Bild 15: Trapez-Sandwichplatten

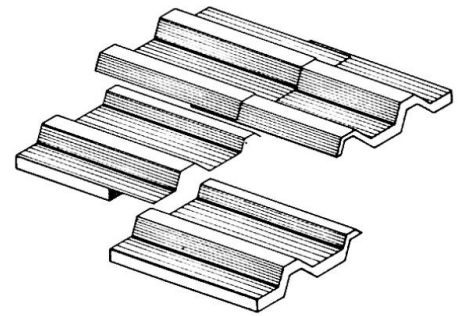


Bild 16: Trapez-Sandwichplatten

steifigkeit mit der Sandwichsteifigkeit und gewährleisten die erforderliche Wärmedämmung mit Dampfsperre. Durch die nicht parallele, sondern kongruente Ausbildung der beiden Deckschichten werden die Platten ineinander



Bild 17: Sandwich-Zylinder-Schalendach

stapelbar. Bei der Seitenstoßdeckung der Längsränder ist die gemeinsame Dicke der überlappenden Stoßfuge gleich der Dicke des Normaltrapezquerschnitts, und die Längsstoßdeckung wird erreicht durch Überschießen des dünnen oberen Deckbleches der oberen Platte.

Die Kombination dreier Versteifungsarten, nämlich Sandwichversteifung mit der Profil- und der Schalenversteifung wurde bei dem 10 m bis 15 m weitgespannten Kreiszyinderschalendach nach Bild 17 angewandt. In der Planung ist z. Zt. eine 40 - 50 m weitgespannte Kugelschale in Sandwichbauweise aus Fertigteilen mit Ortausschäumung der

Fugen (Bild 18), wobei für die Deckschichten 1 mm dickes verzinktes und kunststoffbeschichtetes Stahlblech und für die Kernschicht 150 mm dicker Polyurethan-Hartschaum vorgesehen ist. Die Firmen Bayer (Chemie) und Hoesch (Stahl) beabsichtigen, diese weitgespannte Sandwichkuppel als Demonstrations- und Versuchsobjekt für die Internationale Messe 1969 in Hannover zu errichten.

Es liegt natürlich nahe, für höchste Beanspruchungen im Hoch- und Brückenbau auch an Stahlkerne für im Werkstoff homogene Sandwichplatten zu denken. Erste Überlegungen zielen mit Trapez- und Röhrenkernschichten auf isotrope (Bild 19) wie auch auf orthotrope (Bild 20) Sandwichtafeln, die als Brück-

kenfahrbahntafeln eingesetzt werden könnten. Die schubfeste Verbindung zwischen Stahldeckschichten und Stahlkernschichten wirtschaftlich herzustellen, wird das eigentliche Problem darstellen.

Die aus der Luft- und Raumfahrt übernommene Sandwichtechnik bietet dem Stahlbau die Möglichkeit, in Ergänzung zum Skelett-
Stahlbau den Kontinuum-
Stahlbau wirtschaftlich zu betreiben und neben den orthotropen Rippenstahlfahrbahnen möglicherweise eine reizvolle Variante in Gestalt von Sandwichstahlfahrbahnen zu entwickeln.

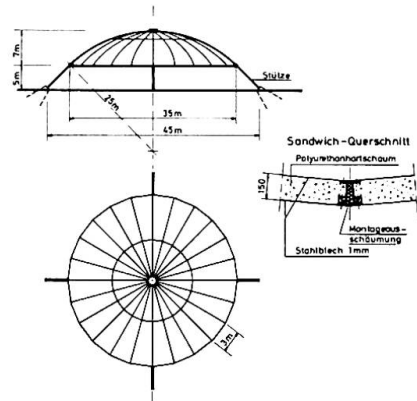


Bild 18: Sandwich-Kugelschale

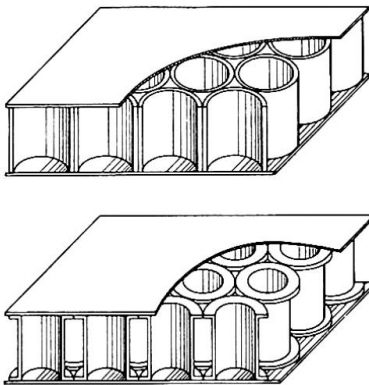


Bild 19: Isotrope Stahlkern-Sandwichplatten

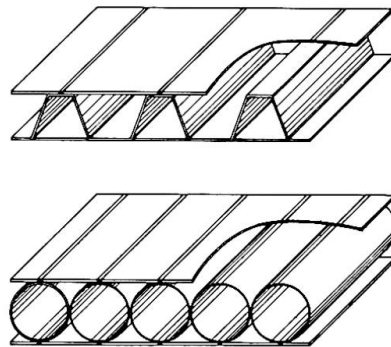


Bild 20: Orthotrope Stahlkern-Sandwichplatten

Neben dem Ausbau der Theorie werden weitere Versuche notwendig sein, die wie die vorausgegangenen an den Stahlbau-Instituten der Technischen Universitäten Darmstadt und Karlsruhe durchgeführt werden sollen.

Literaturverzeichnis

1. Williams, D. Flat sandwich panels under compressive end loads
Roy. Aircr. Est., 1941
2. Flügge, W. Marguerre, K. "Théorie de la stabilité en compression de la Plaque Sandwich" - Les dimensions optima de la Plaque Sandwich comprimée" - Rep. 421 R1 und 421 R2, Off. Nat. d' Etudes et de Recherches Aéronautiques, Paris 1947
3. Reissner, E. Contributions to the problem of structural analysis of sandwichtype plates and shells. Theorie and practice of sandwich construction in aircraft. A symposium Preprint No. 165/ 1948
4. Reissner, E. Finite deflections of sandwich plates. - Journal of the aeronaut. sci. Vol. 15, No. 7, 1948
5. Neuber, H. "Theorie der Druckstabilität der Sandwichplatte", ZAMM/ 1952, Nr. 11, 12, 33 und 1953 Nr. 1, 2
6. Prusakov, A. P. Osnovnyje uravnenija izgiba i ustojčivosti trechslojnych plastin s legkim zapolnitelem, 1951
7. Dundrová, V. Kovařík, V. Šlapák, P. Teorie ohybu sendvičových desek, 1965
8. Jungbluth, O. Witte, H. Das Verbundsystem Stahl/Kunststoff in der Sandwich-Technik. HOESCH-Berichte aus Forschung und Entwicklung unserer Werke, Heft /68, z. Zt. im Druck

ZUSAMMENFASSUNG

Neben den im Stahlbau üblichen 3 Versteifungsarten von Stahlblechen, das Krümmen zu Schalen, das Profilieren der Gesamtfläche, das Anfügen von Einzelrippen, bietet eine 4. Versteifungstechnik, das Zusammenfügen zur Sandwichbauweise, Vorteile. Für das System Polyurethan-Hartschaum zwischen Stahldeckblechen liefert die Energiemethode mit dem Ritz'schen Verfahren genügend genaue Ergebnisse, die mit Traglastversuchen recht gut übereinstimmen. Neuartige Sandwich-Flächentragwerke, darunter solche großer Spannweite, werden beschrieben.

SUMMARY

Apart from the traditional methods of tempering steel sheets

- chilling
- profiling of the whole surface
- ribbing

a fourth method, laminating in sandwich style, offers advantages. The energy method (Ritz treatment) gives sufficiently accurate results agreeing very well with the loading tests to justify the "polyurethane hard foam between steel sheets" system. Novel sandwich sheet supporting structures including those with extensive width span are being described.

RÉSUMÉ

En dehors des trois manières habituelles dans la construction métallique de raidissement des tôles d'acier, à savoir:

- le pliage en coquille
- le profilage de la surface totale
- l'adjonction de barres de renforcement séparées

un 4ème procédé technique de raidissement, c'est-à-dire l'assemblage sous forme de sandwich présente des avantages. Pour le système de mousse dure de polyurethan entre des tôles d'acier, la méthode d'énergie suivant le procédé de Ritz donne des résultats assez précis qui concordent bien avec les essais de charge. Des récents éléments de support sandwich, notamment de grandes portées, sont décrits.

Leere Seite
Blank page
Page vide