

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 1770/2011  
(22) Anmeldetag: 30.11.2011  
(45) Veröffentlicht am: 15.04.2013

(51) Int. Cl. : **E04G 11/04** (2006.01)  
**E04G 1/36** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
US 7506483 B2

(73) Patentinhaber:  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN  
1040 WIEN (AT)

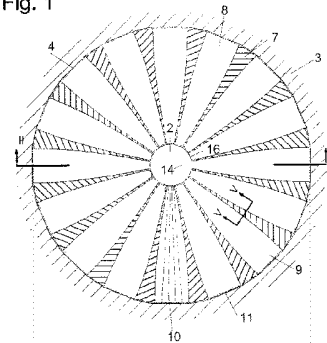
(72) Erfinder:  
KOLLEGGER JOHANN DR.  
KLOSTERNEUBURG (AT)  
KROMOSER BENJAMIN DIPL.ING.  
AMSTETTEN (AT)

### (54) VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON ZWEIFACH RÄUMLICH GEKRÜMMTEN SCHALEN

(57) Das Verfahren zur Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Schale (1) umfasst:

- Auflegen einer ersten Folie (5) und einer zweiten Folie (6), die an ihren Rändern miteinander dicht verbunden sind, auf einer Grundfläche (2);
- Auflegen von keilförmigen Pneus (7) auf der zweiten Folie (6);
- Aufblasen der keilförmigen Pneus (7);
- Herstellen von Schalensegmenten (8) durch Verlegen einer Bewehrung und Einbringen eines gießfähigen, aushärtenden Baustoffs (9) zwischen den keilförmigen Pneus (7);
- Anordnen zumindest eines flexiblen Zugglieds (11) in Umfangsrichtung am Außenrand (4) der Grundfläche (2);
- Anbringen einer Auflast auf den Schalensegmenten (8) entlang des Außenrandes (4);
- Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente (8) durch Einblasen von Luft zwischen der ersten Folie (5) und der zweiten Folie (6) unter Zugbelastung des Zugglieds (11) in Umfangsrichtung;
- Verfüllen der Fugen (12) zwischen den Schalensegmenten (8) mit einem aushärtenden Vergussmaterial (13).

Fig. 1



## Beschreibung

### VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON ZWEIFACH RÄUMLICH GEKRÜMMTEN SCHALEN

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen.

**[0002]** Schalen sind Flächentragwerke, die zum Beispiel als Überdachung für Ausstellungshallen oder Veranstaltungshallen verwendet werden können.

**[0003]** Unter zweifach räumlich gekrümmten Schalen werden Flächentragwerke verstanden, die in zwei unterschiedlichen Raumebenen gekrümmt sind. Solche zweifach räumlich gekrümmten Schalen können zum Beispiel als Überdachung für Ausstellungshallen oder Veranstaltungshallen verwendet werden.

**[0004]** Besonders geeignet für die Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen sind Werkstoffe, die sich gießen lassen, wie z.B. Stahlbeton, Kunststoffe, Wasser bzw. Eis.

**[0005]** Schalenträgerwerke zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei geeigneter Form und Lagerung Lasten überwiegend durch Membrankräfte abtragen. Dies führt zu einer äußerst günstigen Materialausnutzung und geringem Materialverbrauch. Den Ersparnissen beim Materialverbrauch stehen aber erhöhte Lohnkosten für die Herstellung räumlich gekrümmter Schalungen entgegen. Ausgeführte Schalenträgerwerke, wie sie beispielsweise in „Räumliche Dachträgerwerke - Konstruktion und Ausführung“ von Hermann Rühle, Band 1, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1969, S. 177, 248, 256 und „Heinz Isler - Schalen“ von Ekkehard Ramm und Eberhard Schunk (Hrsg.), Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1986, S. 51, 68, 70, 77 beschrieben sind, weisen in der Regel komplizierte, räumlich gekrümmte Schalungen aus Holz und/oder Stahl auf.

**[0006]** Um die Kosten für den Bau räumlich gekrümmter Schalungen zu sparen, sind auch pneumatische Schalungen bekannt geworden. Schalen in Kugelform oder in Zylinderform und Schalen mit mehr oder weniger geringfügigen Abwandlungen dieser Grundformen können auf diese Weise hergestellt werden, siehe z.B. „Kuppelbau mit pneumatischer Schalung“ von Franz Derflinger, in „Beton- und Stahlbetonbau“, Jahrgang 1983, Heft 11, Seite 299 bis 302.

**[0007]** Um die Form einer pneumatischen Schalung zu verändern, wird in der DE 35 00 153 vorgeschlagen, auf der Oberfläche der pneumatischen Schalung radial verlaufende Seile anzuordnen, die gegen die pneumatische Schalung vorgespannt sind. Mit der pneumatischen Schalung gemäß DE 35 00 153 wird die Krümmung der Schalung in der Nähe der Seile örtlich erhöht, was günstig für die Stabilität der auf dieser Schalung herzustellenden Schale ist.

**[0008]** Aufwändig bei pneumatischen Schalungen ist die Herstellung des Pneus aus Zuschnitten. Nachteilig ist, dass das Aufbringen des Baustoffs der Schale in dünnen Schichten, z.B. durch Spritzbeton, erfolgen muss, weil die Tragfähigkeit des Pneus für gleichmäßig verteilte Lasten zwar hoch ist, örtliche Lasten aber zu großen Verschiebungen führen.

**[0009]** Der Begriff „Pneu“ bezeichnet allgemein ein aufblasbares Gebilde.

**[0010]** Weil das Aufbringen des Spritzbetons auf den Pneu zur Herstellung einer Betonschale oder das Aufspritzen von Wasser auf den Pneu zur Herstellung einer Eisschale ein aufwändiger Herstellungsvorgang ist, ist in der EP 1 706 553 vorgeschlagen worden, eine Platte aus gießfähigem Material wie z.B. Beton oder Wasser bzw. Eis auf einer ebenen Arbeitsfläche herzustellen und die Platte anschließend durch das Aufblasen eines Pneus und das Anspannen von Spanngliedern in eine Schale umzuformen. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass ein zweites weiches Material in der Platte eingelegt sein muss, das sich während des Umformungsprozesses von der Platte zur Schale plastisch verformt, aber in der endgültigen Schale verbleibt. Nachteilig ist weiterhin, dass die Krümmung der mit diesem Verfahren herzustellenden Schale begrenzt ist, weil die im weichen Material während des Umformungsprozesses entstehenden Druckspannungen zu einem Stabilitätsversagen der Bereiche mit weichem Material führen könnten. Die Bereiche mit weichem Material sind deshalb auf kleine Abmessungen beschränkt.

**[0011]** Um das Herstellen einer zweifach gekrümmten Schale aus einer ebenen Ausgangsform zu ermöglichen, ohne dass ein zweites weiches Material in der endgültigen Schale verbleibt, ist in der AT 506 902 vorgeschlagen worden, ebene Flächentragwerkselemente auf einen Pneu aufzulegen, sodass keilförmige Zwischenräume zwischen den eben verlegten Flächentragwerkselementen verbleiben. Die Schale wird durch das Aufblasen des Pneus und das Anspannen von Zuggliedern gebildet. Es hat sich herausgestellt, siehe z.B. „Ice Domes - Development of Construction Methods“ von Sonja Dallinger, Dissertation, Technische Universität Wien, 2011, dass nach diesem Verfahren hergestellte Schalen auf kleine Spannweiten von ca. 10 m beschränkt sind, weil die Zugkräfte im Pneu, die gleich dem Produkt aus Innendruck und Krümmungsradius sind, sonst zu einem Reißen der Fugen des Pneus führen.

**[0012]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung einer zweifach gekrümmten Schale ohne den Aufbau einer räumlich gekrümmten Schalung und des dazugehörigen Lehrgerüsts und ohne den aufwändigen Herstellungsvorgang des Aufspritzens von Baustoff auf eine pneumatische Schalung zu ermöglichen, das nicht auf kleine Spannweiten und Krümmungen begrenzt ist und bei dem kein plastisch verformtes Material in der endgültigen Schale verbleibt.

**[0013]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Schale mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

**[0014]** Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst folgende Schritte:

**[0015]** - Auflegen einer ersten Folie und einer zweiten Folie auf einer, vorzugsweise ebenen, Grundfläche, wobei die Folien an ihren Rändern dicht miteinander verbunden sind;

**[0016]** - radiales Auflegen von keilförmigen Pneus auf der zweiten Folie auf einem Flächenanteil der Grundfläche, der etwa der Differenz zwischen der Grundfläche und der Oberfläche der Schale entspricht;

**[0017]** - Aufblasen der keilförmigen Pneus, deren Höhe im aufgeblasenen Zustand mindestens gleich der Dicke der Schale ist;

**[0018]** - Herstellen von Schalensegmenten durch Verlegen einer Bewehrung und Einbringen eines gießfähigen und aushärtenden Baustoffs auf der Grundfläche zwischen den keilförmigen Pneus;

**[0019]** - Anordnen zumindest eines flexiblen Zugglieds, das verschieblich gegenüber den Schalensegmenten ausgebildet ist, in Umfangsrichtung am äußeren Rand der Grundfläche;

**[0020]** - Anbringen einer Auflast auf den Schalensegmenten entlang des äußeren Randes der Grundfläche;

**[0021]** - Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente durch Einblasen von Luft zwischen die erste und die zweite Folie unter Zugbelastung des zumindest einen Zugglieds in Umfangsrichtung;

**[0022]** - Verfällen der Fugen zwischen den Schalensegmenten mit einem aushärtenden Vergussmaterial.

**[0023]** Die Grundfläche wird auf einer Arbeitsfläche, vorzugsweise einer ebenen Arbeitsfläche, eingemessen und so dimensioniert, dass die Grundfläche größer ist als der Grundriss der Schale und mindestens die Ausmaße der auf die Arbeitsfläche übertragenen Oberfläche der Schale aufweist.

**[0024]** Nach dem Abschluss des Umformungsprozesses, d.h. dem Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente sind die einzelnen Schalensegmente durch Fugen voneinander getrennt. Diese werden mit einem aushärtenden Vergussmaterial verfüllt, wodurch eine hohe Stabilität der so gebildeten Schale sichergestellt ist.

**[0025]** Zweckmäßig werden die Schalensegmente aus Beton, Stahlbeton, Faserbeton, textilbewehrtem Beton, Kunststoff oder Eis gebildet, da diese Materialien eine hohe Stabilität der Scha-

le gewährleisten. Des Weiteren werden zweckmäßig Zugglieder aus Spanndrahtlitzen, Monolitzen, Edelstahlseilen, Edstahlilitzen oder aus faserverstärktem Kunststoff gebildet, weil sie die nötige Zugfestigkeit und Flexibilität aufweisen.

**[0026]** Als Vergussmaterial hat sich Zementmörtel, Kunstharz, Kunststoff oder Wasser bewährt.

**[0027]** Gemäß einer bevorzugten Variante werden die zwei übereinanderliegenden Folien mit einer gasdurchlässigen Schicht, insbesondere einem zwischen den Folien eingelegten Vlies und/oder textilem Flächengebilde gebildet, wobei die übereinanderliegenden Folien an ihren Rändern dicht miteinander verbunden werden und eine Gaseinleitvorrichtung an einer Folie vorgesehen wird.

**[0028]** Die Folien bestehen zweckmäßig aus Polyvinylchlorid oder Polyethylen in allen denkbaren Varianten.

**[0029]** Eine gute Anpassung an eine gekrümmte Schale durch die Schalensegmente ergibt sich, wenn mindestens ein Schalensegment vor dem Umformungsprozess eingeschnitten wird, wobei der Schnitt von der Oberfläche bis in die Nähe mindestens einer Bewehrung geführt wird und etwa orthogonal zur Bewehrung angeordnet wird.

**[0030]** Ein bevorzugtes Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass das Anordnen von die Schale bildenden Schalensegmenten auf der Folie durch Aufgießen eines die Schalensegmente bildenden gießfähigen Materials, wie Beton, Kunststoff oder Wasser bewerkstelligt wird, wobei die Grundfläche mit einer umlaufenden Randabschalung zur Einfassung des gießfähigen Materials versehen wird.

**[0031]** In einer zweckmäßigen Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt das Anbringen einer Auflast entlang des äußeren Randes der Grundfläche, indem die Dicke der Schalensegmente entlang des äußeren Randes der Grundfläche größer ausgebildet wird als die Dicke der inneren Bereiche der Schalensegmente.

**[0032]** In einer weiteren Variante des Verfahrens ist vorgesehen, dass während des Formgebungsprozesses der Schale der Luftdruck im Raum zwischen erster Folie und zweiter Folie unterschiedlich zu den Luftdrücken in den keilförmigen Pneus eingestellt wird, unabhängig voneinander eingestellt werden. Wenn z.B. der Luftdruck zwischen den Folien größer eingestellt wird als der Luftdruck in den Pneus, führt das zu einem teilweisen Eindringen der Folie in die Fugen, was wiederum beim späteren Entfernen der Pneus aus den Fugen vorteilhaft sein kann, wie weiter unten anhand eines Ausführungsbeispiels erklärt wird.

**[0033]** Weiters kann vorgesehen werden, dass der Luftdruck in den keilförmigen Pneus unterschiedlich eingestellt wird, um ein gleichmäßiges Schließen der Fugen während des Formgebungsprozesses zu erreichen. Vorzugsweise stellt man die Luftdrücke so ein, dass die Fugen nach dem Abschluss des Formgebungsprozesses in der Draufsicht eine angenähert rechteckige Form aufweisen.

**[0034]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird eine in der Mitte der Grundfläche liegende Aussparung ausgebildet, und werden die Schalensegmente durch die dazwischen verlegten keilförmigen Pneus voneinander getrennt und werden die Schalensegmente am Rand der Aussparung durch einen Zugring miteinander verbunden werden.

**[0035]** Es hat sich für die Durchführung des Verfüllens der Fugen mit Vergussmaterial als zweckmäßig erwiesen, wenn nach dem Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente der Luftdruck der in den Raum zwischen erster Folie und zweiter Folie eingeblasenen Luft aufrecht erhalten wird, die Luft aus den keilförmigen Pneus abgesaugt wird und anschließend das Verfüllen der Fugen zwischen den Schalensegmenten mit einem aushärtenden Vergussmaterial durchgeführt wird.

**[0036]** Zur Erzielung einer Schale mit hoher Stabilität ist es zweckmäßig, wenn auf die zweifach gekrümmte Schale nach Abschluss des Formgebungsprozesses eine Schicht bestehend aus einem Baustoff aufgebracht wird, die mit der zweifach gekrümmten Schale schubfest verbunden wird.

**[0037]** Die Erfindung ist nachfolgend anhand in der Zeichnung dargestellter Ausführungsbeispiele näher erläutert.

**[0038]** Es zeigen:

**[0039]** Fig. 1 eine Draufsicht auf die Arbeitsfläche nach Verlegen der keilförmigen Pneus und dem Herstellen der Schalensegmente;

**[0040]** Fig. 2 einen Schnitt längs der Linie II-II der Fig. 1;

**[0041]** Fig. 3 eine der Fig. 1 entsprechende Draufsicht auf die Schale nach Abschluss des Formgebungsprozesses;

**[0042]** Fig. 4 einen Schnitt längs der Linie IV-IV der Fig. 3;

**[0043]** Fig. 5 einen Schnitt längs der Linie V-V der Fig. 1;

**[0044]** Fig. 6 einen der Fig. 5 entsprechenden Schnitt während des Formgebungsprozesses;

**[0045]** Fig. 7 einen Schnitt längs der Linie VII-VII der Fig. 3 nach Abschluss des Formgebungsprozesses;

**[0046]** Fig. 8 einen Schnitt längs der Linie VIII-VIII der Fig. 3;

**[0047]** Fig. 9 eine Draufsicht analog zu Fig. 1 auf eine weitere Ausführungsform;

**[0048]** Fig. 10 eine der Fig. 9 entsprechende Draufsicht auf die Schale nach Abschluss des Formgebungsprozesses;

**[0049]** Fig. 11 eine der Fig. 10 entsprechende Draufsicht auf die fertiggestellte Schale nach Aufbringen einer Ortbetonschicht;

**[0050]** Fig. 12 einen Schnitt längs der Linie XII-XII der Fig. 11 durch die Schale;

**[0051]** Fig. 13 eine der Fig. 10 entsprechende Draufsicht mit einer Darstellung der von den Zuggliedern auf die Schale ausgeübten Kräfte;

**[0052]** Fig. 14 einen der Fig. 12 entsprechenden Schnitt durch die Schale mit einer Darstellung der auf die Schale ausgeübten Kräfte.

**[0053]** Im Folgenden wird auf die Fig. 1 und Fig. 2 Bezug genommen:

**[0054]** Das erste Beispiel erläutert die Herstellung einer Schale 1 aus Eis mit der Form eines Kugelabschnitts. Die Schale 1 könnte beispielsweise als Eisbar genutzt werden.

**[0055]** Als erster Schritt wird auf einer Arbeitsfläche 3 der äußere Rand 4 einer Grundfläche 2 eingemessen und markiert.

**[0056]** Als zweiter Schritt werden auf der Grundfläche 2 eine erste Folie 5 und eine zweite Folie 6 ausgebreitet. Als Material für die Folien 5, 6 kann beispielsweise Polyvinylchlorid oder Polyethylen in allen Varianten verwendet werden. Zwischen den Folien 5, 6 ist vorteilhaft eine gasdurchlässige Schicht 15, beispielsweise ein Vlies, angeordnet. Die Folien 5, 6 werden zu diesem Zeitpunkt, oder auch später, randseitig dicht miteinander verbunden.

**[0057]** Als dritter Schritt werden auf der zweiten Folie 6 keilförmige Pneus 7 verlegt. Der Flächenanteil der Grundfläche 2, der mit Pneus 7 belegt wird, entspricht etwa der Differenz zwischen der Grundfläche 2 und der Oberfläche der Schale 1.

**[0058]** Im vierten Schritt wird der verbleibende Teil der Grundfläche 2 unter Einsatz einer geeigneten, entlang des äußeren Randes 4 angebrachten Randabschalung und eines in der Mitte der Grundfläche 2 angeordneten Zugringes 16, schichtenweise mit Wasser angefüllt, das gefrieren gelassen wird. Erst nach dem vollständigen Gefrieren einer Wasserschicht wird eine weitere Wasserschicht aufgespritzt. Beim Erreichen einer bestimmten Eisdicke, die zum Beispiel der halben Schalendicke entspricht, wird eine Bewehrung verlegt. Eine vorteilhafte Art der Bewehrung ist z.B. durch radial angeordnete Spanndrahtlitzen 10, die in Fig. 1 jedoch nur in einem Schalensegment 8 dargestellt sind, verwirklicht.

**[0059]** Entlang des äußeren Randes 4 wird ein gegenüber dem Baustoff 9, hier Eis, verschiebliches Zugglied 11 angeordnet. Ein derartiges Zugglied könnte beispielsweise aus einer gefetteten und in einem Polyethylenhüllrohr angeordneten Spanndrahtlitze bestehen. Die Eisdicke entlang des äußeren Randes 4 wird gemäß Fig. 2 vergrößert, um damit eine zusätzliche Auflast zu schaffen.

**[0060]** Im fünften Schritt erfolgt das Umformen der Schalensegmente 8 durch Einblasen von Luft zwischen die erste Folie 5 und die zweite Folie 6 und durch Zugbelastung des Zugglieds 11.

**[0061]** Wie in Fig. 3 und Fig. 4 dargestellt, ist der Durchmesser der Schale 1 nach Abschluss des Formgebungsprozesses kleiner als der Durchmesser der ebenen Ausgangsform.

**[0062]** Der Luftdruck in den keilförmigen Pneus 7 kann während der Herstellung der Eisschichten geändert werden, damit ein Schnitt durch den Pneu 7 gemäß Fig. 5 eine möglichst rechteckige Form aufweist. Ein Pneu ist gekennzeichnet durch eine im Vergleich zur Dehnsteifigkeit vernachlässigbare Biegesteifigkeit. Deswegen wird ein Querschnitt durch den Pneu 7 wie in Fig. 7 dargestellt Ausbauchungen aufweisen.

**[0063]** Der Pneu wird entweder an der zweiten Folie 6 oder an den Schalensegmenten 8 befestigt, um ein Herausgleiten der Pneus 7 während des Formgebungsprozesses zu verhindern. In Fig. 5 sind schlaufenförmige Verankerungen 17 aus Kunststoff dargestellt, mit denen der Pneu 7 an den Schalensegmenten 8 befestigt ist.

**[0064]** Während des Formgebungsprozesses wird der Abstand zwischen den Schalensegmenten 8 geringer und die Fugen 12 werden kleiner. Fig. 6 zeigt, dass sich die Fuge 12 im Vergleich zu Fig. 5 verkleinert hat. Der Pneu 7 wird an der Oberseite nach oben ausgebaucht. Die Luftdrücke im Raum zwischen den Folien 5, 6 und in den keilförmigen Pneus 7 können unabhängig voneinander eingestellt werden. Fig. 6 zeigt eine Situation, bei der der Luftdruck zwischen den Folien 5, 6 größer ist als der Luftdruck im Pneu 7, was zu einem teilweisen Eindringen der Folie 6 in die Fuge 12 führt. Der Luftdruck in den Pneus 7 kann entweder gleich sein oder für einzelne Pneus 7 verändert werden, um ein gleichmäßiges Schließen der Fugen 12 während des Formgebungsprozesses zu erreichen.

**[0065]** Nach Abschluss des Formgebungsprozesses kann die Luft aus den Pneus 7 abgesaugt werden. Fig. 7 zeigt, wie der Pneu 7 durch das Absaugen aus den Fugen 12 herausgezogen werden kann, so dass er unter den Schalensegmenten 8 zu liegen kommt. Anschließend kann die Fuge 12 mit einem Vergussmaterial 13 verfüllt werden. Der untere Spalt der Fuge 12 wird durch den Pneu 7 und durch Aufrechterhaltung eines Luftdrucks im Raum zwischen den Folien 5, 6 abgedichtet, so dass das Vergussmaterial 13 nicht aus der Fuge austritt.

**[0066]** Die geometrischen Zusammenhänge während des Formgebungsprozesses zur Herstellung der Schale 1 mit der Form eines Kugelabschnitts sind in Fig. 8 dargestellt.

**[0067]** Die Krümmung  $k$  der Schale 1 bzw. des Schalensegments 8 entspricht dem Kehrwert des Radius  $R$ . Die Krümmung  $k$  ist auch gleich der Summe der Dehnung der Bewehrung  $\epsilon_s$  und der Stauchung  $\epsilon_c$  des Baustoffs 9 am unteren Rand des Schalensegments 8 geteilt durch die Länge  $d$ , die dem Abstand zwischen der Bewehrung aus Spanndrahtlitzten 10 und dem unteren Rand des Schalensegments 8 entspricht. Die Bewehrung darf während des Formgebungsprozesses nicht über die Fließgrenze, die das Ende des linearen Zusammenhangs zwischen Spannungen und Verzerrungen markiert, beansprucht werden, weil sonst keine gleichmäßigen Krümmungen in den Schalensegmenten 8 auftreten, sondern örtlich große Risse. Deswegen ist es günstig, eine Bewehrung mit hoher Festigkeit, wie z.B. Spanndrahtlitzten 10 mit einer Fließgrenze von ca.  $1600 \text{ N/mm}^2$  zu verwenden, um hohe Dehnungen und damit große Krümmungen zu erreichen. Eine weitere Vergrößerung der Krümmung wird durch eine Reduktion des Abstands  $d$  erreicht, was bedeutet, dass die Bewehrung nicht am gezogenen Rand des Schalensegments 8, sondern z.B. mittig im Schalensegment 8 angeordnet wird. Es ist vorteilhaft die Schalensegmente 8 mit Einschnitten 18 zu versehen, die von der Oberseite bis in die Nähe der Bewehrung reichen, um eine kontrollierte Rissbildung zu erzielen.

**[0068]** Ein weiteres Ausführungsbeispiel ist anhand der Fig. 9 bis Fig. 14 für die Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Schale 1 erläutert, bei der Beton als Baustoff 9 verwendet wird. Die Schale 1 könnte als Wildüberführung über Eisenbahngleise genutzt werden.

**[0069]** Entsprechend dem in Fig. 1 bis 8 erläuterten Beispiel wird zunächst gemäß Fig. 9 die Grundfläche 2 eingemessen. Dann werden eine erste Folie 5, eine zweite Folie 6 und keilförmige Pneus 7 verlegt, und es wird eine geeignete Randabschalung hergestellt. Die Grundfläche 2 besteht aus zwei Halbkreisen und einem dazwischen angeordneten Rechteck. Keilförmige Pneus 7 sind nur in den halbkreisförmigen Anteilen der Grundfläche 2 angeordnet. Die Pneus 7 sollen bei diesem Beispiel mit der zweiten Folie 6 z.B. durch eine Verklebung verbunden werden.

**[0070]** Anschließend wird eine Bewehrung aus Betonstahl verlegt, die Pneus 7 werden aufgeblasen und Beton als Baustoff 9 eingefüllt.

**[0071]** Der Formgebungsprozess, der nach dem Erhärten des Betons durchgeführt wird, führt gemäß Fig. 10 zu einer Verkleinerung des Umfangs der Schale 1 im Vergleich zur Länge des äußeren Randes 4 der Grundfläche 2.

**[0072]** Unter Aufrechterhaltung des Luftdrucks zwischen den Folien 5, 6 kann anschließend gemäß Fig. 11 und Fig. 12 auf einem Teil der Oberfläche der Schale 1 eine Bewehrung verlegt und eine Ortbetonschicht 19 aufgebracht werden. Nach dem Erhärten der Ortbetonschicht 19 können die Randbereiche der Schale 1, die nicht mit einer Ortbetonschicht 19 bedeckt sind, abgebrochen werden, um Öffnungen für die Gleise unter der Schale 1 zu schaffen.

**[0073]** Fig. 13 zeigt die Kräfte, die von den Zuggliedern 11 und 11' während des Formgebungsprozesses auf die Schale 1 ausgeübt werden. Das entlang des äußeren Randes 4 verlegte Zugglied 11 übt in den Bereichen, in denen es entlang des äußeren Randes 4 kreisförmig verlegt wurde, Umlenkkräfte  $u$  auf den Schalenrand aus. Die gerade verlegten Zugglieder 11' üben Verankerungskräfte  $F$  auf den Schalenrand aus.

**[0074]** Fig. 14 zeigt in einem Schnitt die Wirkung der Umlenkkräfte  $u$  des Zugglieds 11 und des Luftdrucks  $p$  zwischen den Folien 5, 6 auf die Schale 1. Zu jedem Zeitpunkt während des Formgebungsprozesses stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Eigengewicht der Schale und den Verankerungskräften  $F$ , den Umlenkkräften  $u$  und dem Luftdruck  $p$  ein.

**[0075]** In den Beispielen wurde die Herstellung von Schalen mit kreisförmigem und ellipsenähnlichem Grundriss beschrieben. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist jedoch die Herstellung zweifach räumlich gekrümmter Schalen beliebiger Form über beliebigen Grundrissen möglich.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Schale
- 2 Grundfläche
- 3 Arbeitsfläche
- 4 äußerer Rand
- 5 erste Folie
- 6 zweite Folie
- 7 keilförmiger Pneu
- 8 Schalensegment
- 9 Baustoff
- 10 Spanndrahtlitzen
- 11 Zugglied
- 12 Fuge
- 13 Vergussmaterial

- 14 Aussparung
- 15 gasdurchlässige Schicht
- 16 Zugring
- 17 Verankerung
- 18 Einschnitt
- 19 Ortbetonschicht

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer zweifach räumlich gekrümmten Schale (1), **gekennzeichnet durch**:
  - Auflegen einer ersten Folie (5) und einer zweiten Folie (6) auf einer, vorzugsweise ebenen, Grundfläche (2), wobei die Folien (5, 6) an ihren Rändern dicht miteinander verbunden sind;
  - radiales Auflegen von keilförmigen Pneus (7) auf der zweiten Folie (6) auf einem Flächenanteil der Grundfläche (2), der etwa der Differenz zwischen der Grundfläche (2) und der Oberfläche der Schale (1) entspricht;
  - Aufblasen der keilförmigen Pneus (7), deren Höhe im aufgeblasenen Zustand mindestens gleich der Dicke der Schale (1) ist;
  - Herstellen von Schalensegmenten (8) durch Verlegen einer Bewehrung und Einbringen eines gießfähigen und aushärtenden Baustoffs (9) auf der Grundfläche (2) zwischen den keilförmigen Pneus (7);
  - Anordnen zumindest eines flexiblen Zugglieds (11), das verschieblich gegenüber den Schalensegmenten (8) ausgebildet ist, in Umfangsrichtung am äußeren Rand (4) der Grundfläche (2);
  - Anbringen einer Auflast auf den Schalensegmenten (8) entlang des äußeren Randes (4) der Grundfläche (2);
  - Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente (8) durch Einblasen von Luft zwischen der ersten Folie (5) und der zweiten Folie (6) unter Zugbelastung des zumindest einen Zugglieds (11) in Umfangsrichtung;
  - Verfüllen der Fugen (12) zwischen den Schalensegmenten (8) mit einem aushärtenden Vergussmaterial (13).
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass nicht die gesamte Grundfläche (2) mit keilförmigen Pneus (7) und einem aushärtenden Baustoff (9) belegt wird, wodurch Aussparungen (14) entstehen, die in der Schale (1) eine oder mehrere vorbestimmte Ausnehmungen bilden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen der ersten Folie (5) und der zweiten Folie (6) eine gasdurchlässige Schicht (15), vorzugsweise gebildet aus einem Vlies und/oder textilem Flächengebilde, verlegt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt des Anbringens einer Auflast entlang des äußeren Randes (4) der Grundfläche (2) mittels einer Vergrößerung der Dicke der Schalensegmente (8) entlang des äußeren Randes (4) der Grundfläche (2) durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass während des Formgebungsprozesses der Schale (1) der Luftdruck im Raum zwischen erster Folie (5) und zweiter Folie (6) unterschiedlich zum Luftdruck bzw. zu den Luftdrücken in den keilförmigen Pneus (7) eingestellt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Luftdrücke in den keilförmigen Pneus (7) unterschiedlich eingestellt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine in der Mitte der Grundfläche (2) liegende Aussparung (14) ausgebildet wird, dass die Schalensegmente (8) durch die dazwischen verlegten keilförmigen Pneus (7) voneinander getrennt werden, und dass die Schalensegmente (8) am Rand der Aussparung (14) durch einen Zugring (16) miteinander verbunden werden.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass nach dem Verkrümmen und Anheben der Schalensegmente (8) der Luftdruck der in den Raum zwischen erster Folie (5) und zweiter Folie (6) eingeblasenen Luft aufrecht erhalten wird, die Luft aus den keilförmigen Pneus (7) abgesaugt wird und anschließend das Verfüllen der Fugen (12) zwischen den Schalensegmenten (8) mit einem aushärtenden Vergussmaterial (13) durchgeführt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf die zweifach gekrümmte Schale (1) nach Abschluss des Formgebungsprozesses eine Schicht bestehend aus einem Baustoff (9) aufgebracht wird, die mit der zweifach gekrümmten Schale (1) schubfest verbunden wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schalensegmente aus Beton, Stahlbeton, Faserbeton, textildbewehrtem Beton, Kunststoff oder Eis gebildet werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zugglieder aus Spanndrahtlitzen, Monolitzen, Edelstahlseilen, Edlestahlitzen oder aus faserverstärktem Kunststoff gebildet werden.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Vergussmaterial Zementmörtel, Kunstharz, Kunststoff oder Wasser verwendet wird.
13. Zweifach räumlich gekrümmte Schale (1), hergestellt nach einem Verfahren gemäß einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schale (1) abwechselnd aus mindestens einem Baustoff (9) mit einer Bewehrung (10) und mindestens einer mit einem aushärtenden Vergussmaterial (13) verfüllten Fuge (12) zusammengesetzt ist.

**Hierzu 5 Blatt Zeichnungen**

Fig. 1

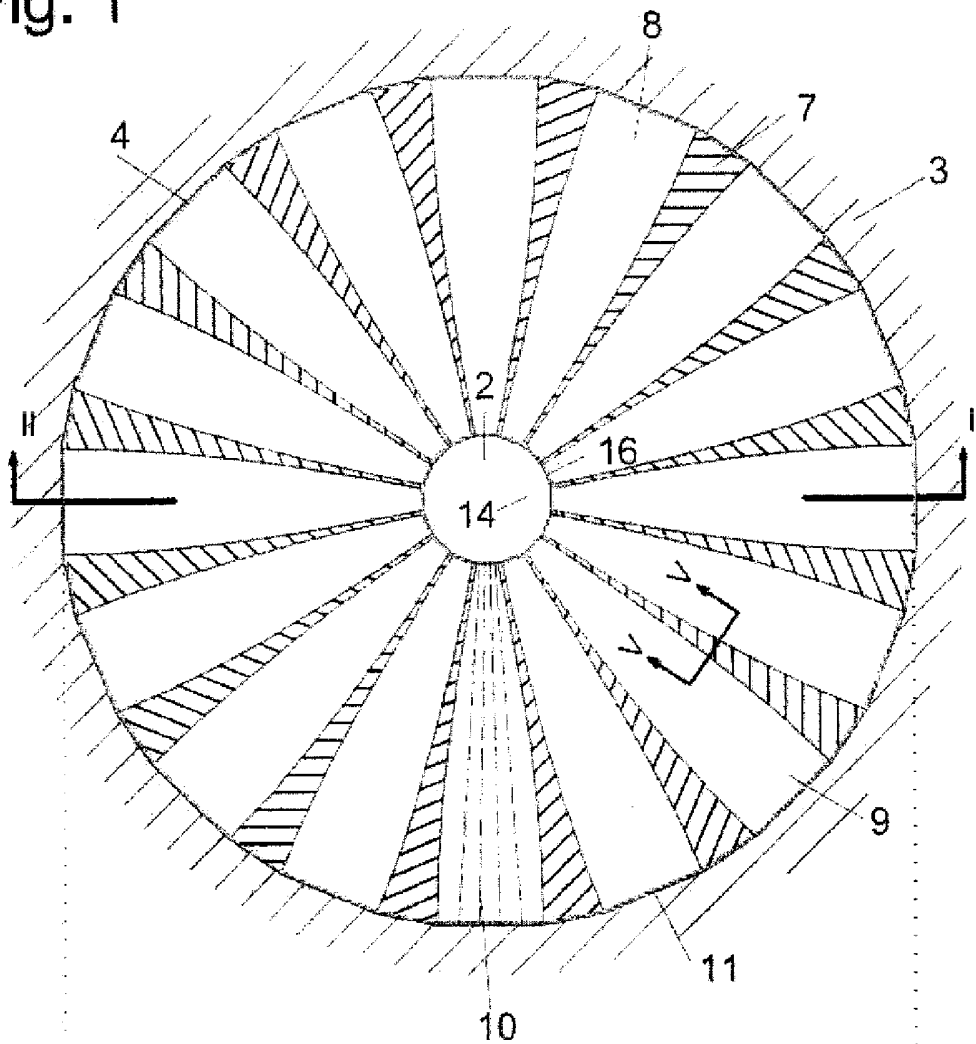


Fig. 2

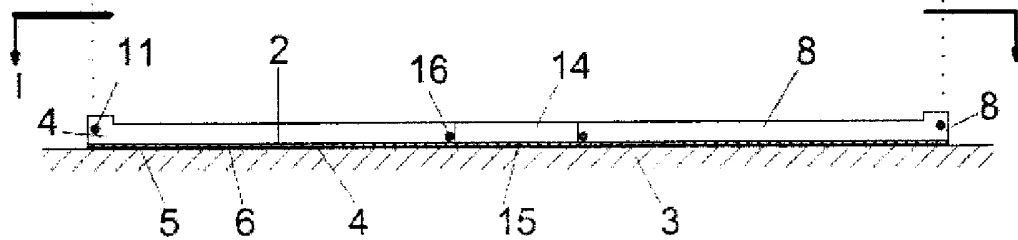


Fig. 3

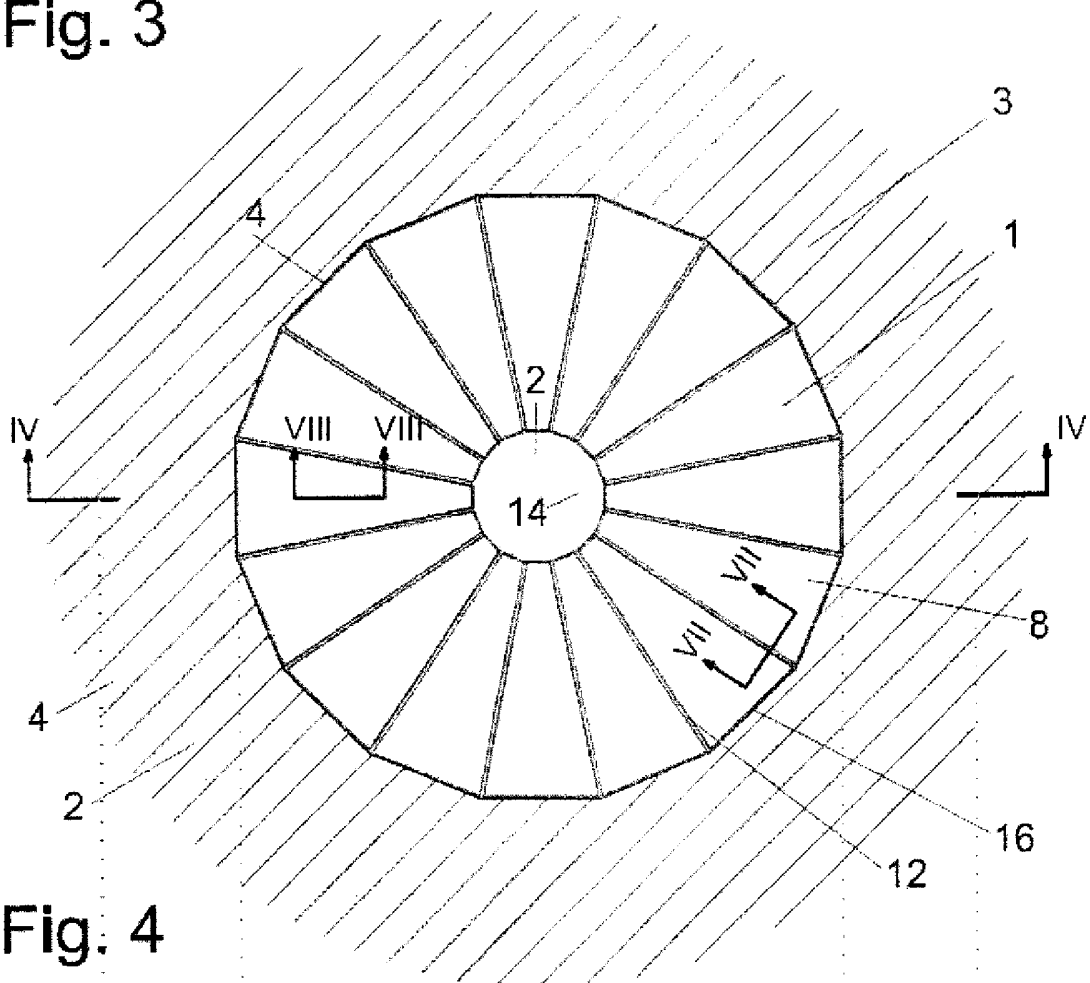


Fig. 4

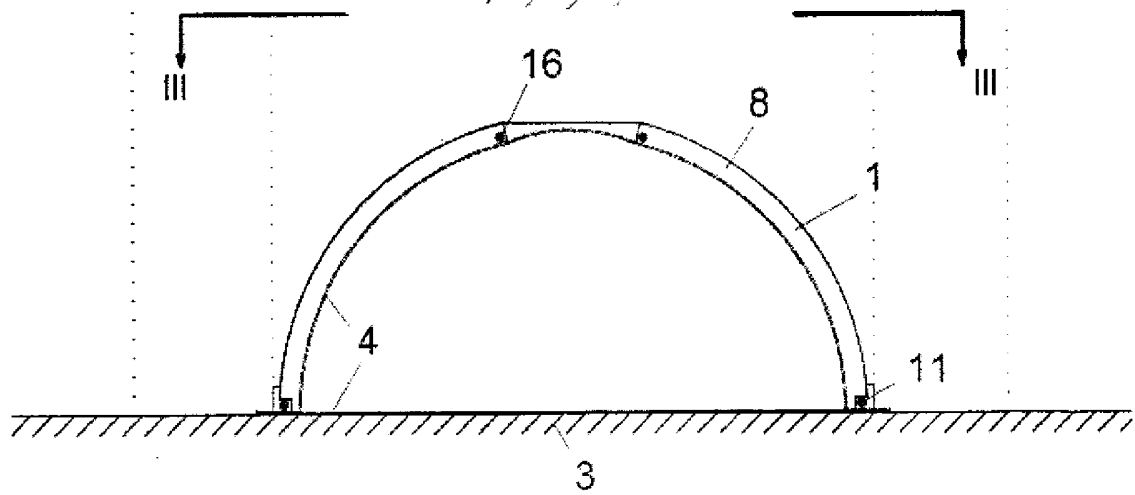


Fig. 5

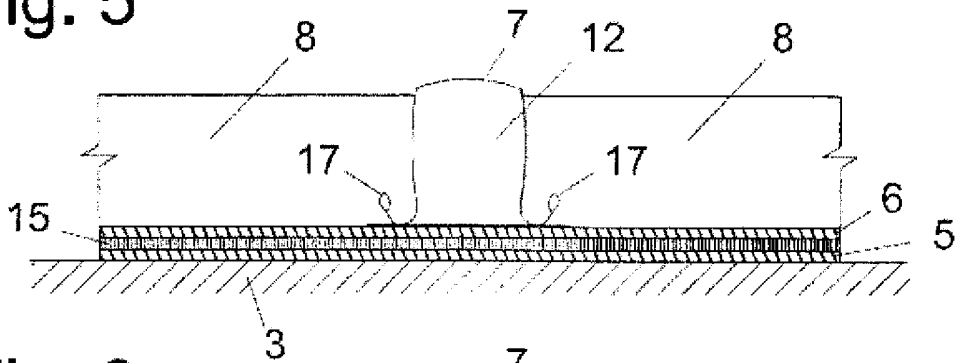


Fig. 6

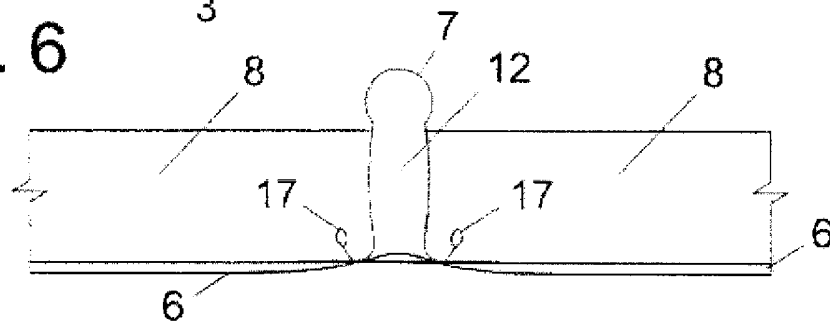


Fig. 7

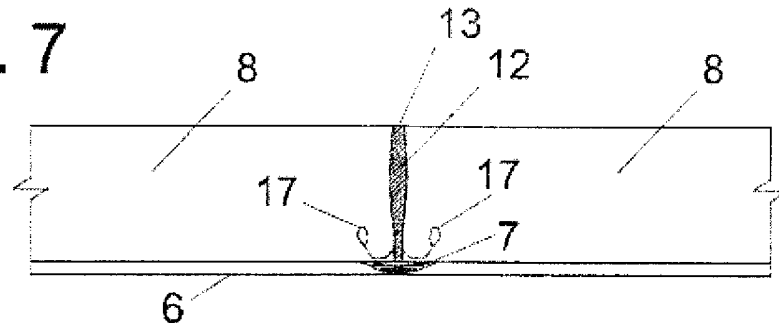


Fig. 8

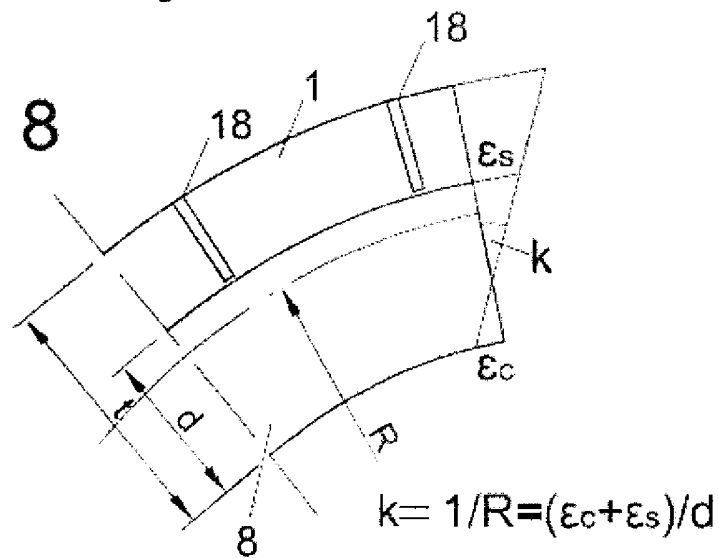


Fig. 9

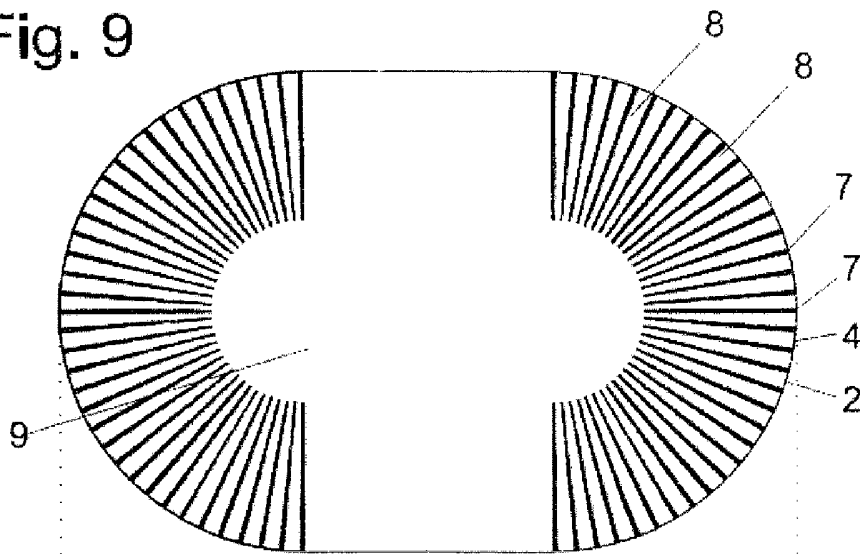


Fig. 10

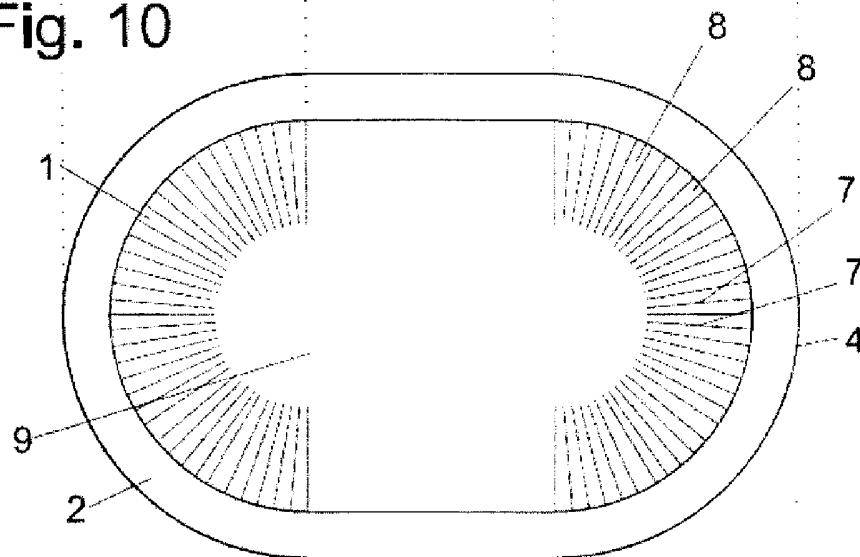


Fig. 11

