

Doppelt gekrümmte Schalen und Gitterschalen aus Textilbeton

Christian Schätzke¹, Hartwig N. Schneider², Till Joachim³, Markus Feldmann⁴,
Daniel Pak⁵, Achim Geßler⁶, Josef Hegger⁷, Alexander Scholzen⁸

Zusammenfassung: Doppelt gekrümmte Schalen und Gitterschalen sind Tragsysteme, die, obwohl in Ihrer Wirkungsweise grundsätzlich verschieden, besonders für den Einsatz von Textilbeton geeignet sind. Aufgrund ihrer doppelten Krümmung weisen derartige Tragsysteme zahlreiche Besonderheiten hinsichtlich Formfindung, Lastabtrag und Herstellung auf. Anhand eines Ausführungsbeispiels von monolithischen Schirmschalen und Konstruktionsstudien zu Gitterschalen werden die Strukturkonzepte und ihre Auswirkungen auf das Tragverhalten, das Bewehrungskonzept und die Auswirkungen auf die Herstellung sowie die Bauteilfüugung erläutert.

Summary: Structural systems based on double curved monolithic shells or gridshells are both characterised by their good load bearing behaviour depending on the chosen geometry. Although both systems are different regarding their functionality they are suitable applications for TRC while taking advantage of the main constructive and design characteristics of the material. In describing an execution example of an umbrella-shaped shell-structure and design studies on gridshells the relation between structural concept and load bearing behaviour and the relation between the reinforcement concept and production as well as joining are discussed.

¹ Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Baukonstruktion, RWTH Aachen University

² Prof. Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Baukonstruktion, RWTH Aachen University

³ Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Baukonstruktion, RWTH Aachen University

⁴ Prof. Dr.-Ing., Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, RWTH Aachen University

⁵ Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, RWTH Aachen University

⁶ Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, RWTH Aachen University

⁷ Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

⁸ Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der Verbundwerkstoff Textilbeton besteht aus zwei Komponenten, die jeweils für sich genommen über vergleichsweise hohe Festigkeitswerte verfügen. Die Matrix weist Druckfestigkeiten zwischen $60 - 70 \text{ N/mm}^2$ auf und die textile Bewehrung Zugfestigkeiten zwischen 350 und 1400 N/mm^2 im Bauteil (abhängig vom Bewehrungsmaterial, Querschnittsfläche und Beschichtung). Daher liegt es nahe, Anwendungen für diesen neuen Werkstoff unter anderem im Bereich der tragenden Strukturen zu suchen. Da die Bewehrungsmaterialien beim Textilbeton, anders als beim Stahlbeton, zunächst ausschließlich in flächiger Form vorliegen und die Konzentration von hohen Bewehrungsquerschnitten auf kleinem Raum mit der textilen Bewehrung nicht gelingt, liegt die Anwendung des Materials bei flächenaktiven Tragsystemen nahe. Darüber hinaus sind auch Gitterstrukturen denkbar. Hier sind jedoch mehr als bei den flächenaktiven Systemen Strukturformen geeignet, die nur geringe Zugbelastungen in den Baugliedern verursachen.

Insbesondere Strukturformen mit doppelter Krümmung weisen in vielen Fällen ein günstiges Tragverhalten auf. Während bei flächigen, doppelt gekrümmten Tragwerken im Membranspannungszustand ausschließlich Kräfte parallel zur Oberfläche auftreten, die von dem flächigen Bauteil optimal abgetragen werden können, wird bei Gitterschalen dieser kontinuierliche Kraftfluss unterbrochen. Hier werden die Kräfte durch ein Netz von Stäben geführt, wodurch den Fügepunkten eine besondere Bedeutung für die Kraftweiterleitung zukommt, was sich auf die Gestalt des einzelnen Bauteils und der Gesamtstruktur auswirkt.

Im modernen Stahlbetonbau entstanden vermehrt ab den 1930er Jahren sehr intelligente Strukturformen, die auf Krümmung oder Faltung beruhen. Im Bereich der Schalenkonstruktionen waren es vor allem der mexikanische Architekt Felix Candela [1] (Bild 1a), und später der Schweizer Heinz Isler [2] (Bild 1b), die durch eine rege Bautätigkeit – Isler allein hat im Laufe seines Lebens über tausend Schalendächer realisiert – die Schalenbauweise technologisch voranbrachten. Dabei bildete sich eine Reihe von Strukturformen heraus, die über ein besonders günstiges Tragverhalten verfügten oder sich aufgrund ihrer Geometrie mit geringem Aufwand erzeugen ließen. Insbesondere die sogenannten Regelflächen wie hyperbolische Paraboloiden, Konoide und Rotationshyperboloiden sind Strukturformen, die bis in die 1960er Jahre hinein vielfältige Anwendung fanden, jedoch aufgrund der Korrosionsproblematik der Stahlbewehrung in dünnen Bauteilen heute nicht mehr realisierbar sind. Hier bietet der textilbewehrte Beton durch die Verwendung von Bewehrungsstrukturen aus alkaliresistenten Rovings aus Glas oder Carbon, die Möglichkeit, derartige Tragsysteme mit den charakteristisch geringen Bauteildicken heute wieder herzustellen.



(a) F. Candela, Restaurant in Xochimilco (MEX) [1]

(a) F. Candela, Restaurant in Xochimilco (MEX) [1]



(b) H. Isler, Gartencenter in Camorino (CH) [2]

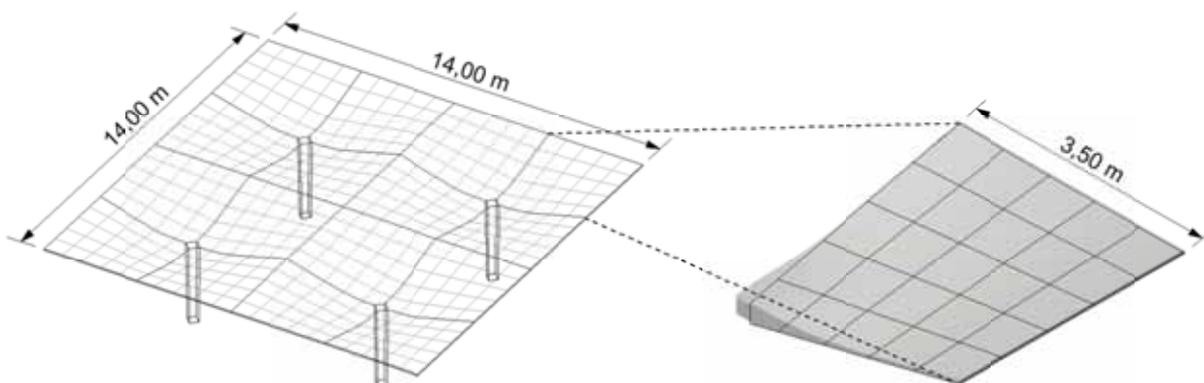
(b) H. Isler, Gardencentre in Camorino (CH) [2]

Bild 1: Historische Schalenträgerwerke**Fig. 1:** Historic shell-structures

2 Monolithische Schalen aus Textilbeton

2.1 Entwurfskonzept und Strukturform

Um die Leistungsfähigkeit von Textilbeton bei flächigen, doppelt gekrümmten Tragsystemen zu verifizieren, realisiert der Sonderforschungsbereich SFB 532 an der RWTH Aachen University bis Ende 2011 einen Großdemonstrator aus doppelt gekrümmten Textilbetonschalen. Das Gebäude soll ab 2012 als Ausstellungspavillon der Fakultät für Bauingenieurwesen dienen.

**Bild 2:** Schalenträgerwerk aus hyperbolischen Paraboloiden, Isometrie**Fig. 2:** Structure-system made of hypar-shells, isometric view

Der Pavillon ist als eingeschossiges, ebenerdiges Gebäude mit einem quadratischen Grundriss mit Außenabmessungen von 14 m x 14 m und einer Höhe von 4 m geplant. Die Tragstruktur besteht, wie in Bild 2 dargestellt, aus einer Addition von vier schirmartigen Dachelementen aus Textilbeton, die jeweils auf einer zentralen Stütze aufgelagert sind. Durch die Anordnung von 2 x 2 Schirmen entstehen in dem quadratischen Baukörper ein zentraler Raum von 7 x 7 m und ein Umgang von 3,5 m Breite. Die Schirme selbst basieren auf der Addition von jeweils vier gleichen, doppelt gekrümmten HP-Flächen (hyperbolische Paraboloiden) mit Abmessungen von 3,5 x 3,5 m.

2.2 Tragverhalten

2.2.1 Numerische Berechnung des Schalentragwerks

Einwirkungen

Die Einwirkungen auf die Textilbetonschale wurden nach DIN 1055 angesetzt und umfassen Eigengewicht, Ausbaulasten (Dacheindeckung), Windlasten, Schneelasten, Temperatur und Schwinden. Für die Bemessung der Schale im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Schnittgrößen der Einzellastfälle mit Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1055 zu kombinieren. Um die maßgebende Lastfallkombination zu identifizieren wurde ein Berechnungstool implementiert, das die Kombinationen automatisiert auswertet und somit erlaubt, die maßgebende Lastfallkombination für jede Stelle der Schale zu bestimmen.

Hauptzugspannungen

Die maßgebende Lastfallkombination für die Bemessung der Textilbetonschale setzt sich aus den symmetrischen Lastfällen, Eigengewicht, Ausbaulast, Schneelast und Winddruck zusammen. Infolge dieser Belastung wirkt in der Schale hauptsächlich ein Membranspannungszustand: in radialer Richtung wirken die Hauptdruckspannungen, tangential verlaufen die Hauptzugspannungen. Die Schalenmitte ist daher unter symmetrischer Belastung vollständig überdrückt, während sich an den Schalenrändern Ringzugspannungen einstellen. In Bild 3 ist der Verlauf der Hauptspannungen exemplarisch für den Lastfall Eigengewicht dargestellt. Die größten Zugspannungen treten in der Mitte der Schalenränder auf. An dieser Stelle weist die Schale ihre minimale Bauteildicke auf und der Querschnitt steht vollständig unter Zugspannung. Für die Bemessung der Textilbetonschale im Grenzzustand der Tragfähigkeit, d.h. für die Festlegung des erforderlichen Bewehrungsgrades ist diese Stelle maßgebend. Aus der FE-Berechnung ergeben sich für die maßgebende Lastfallkombination Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit von 5,8 MPa.

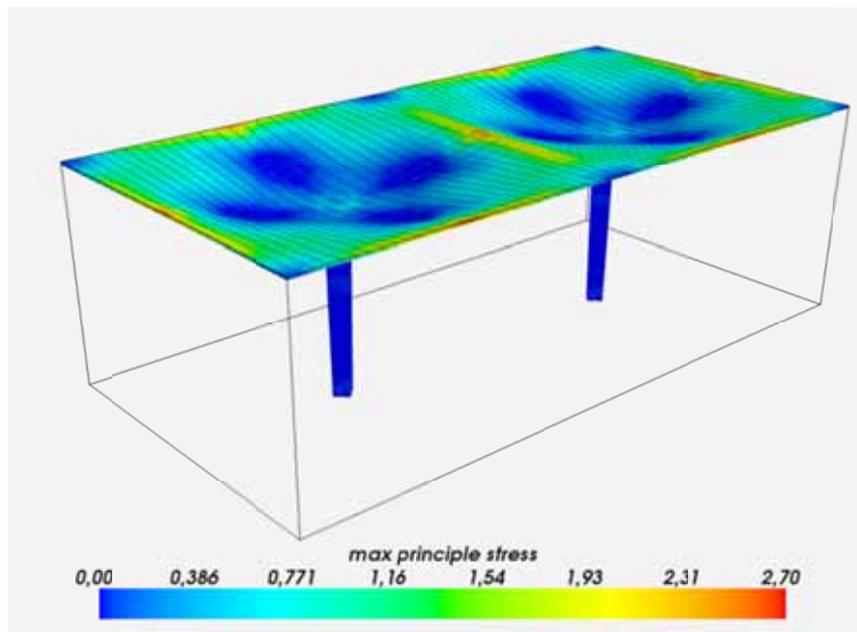


Bild 3: Hauptzugspannungen im Schalentragswerk unter Eigengewicht [MPa].

Fig. 3: Maximal principal tensile stress under dead load [MPa].

2.2.2 Bewehrungskonzept

Die maximale Tragfähigkeit der textilen Bewehrung, so wie sie im Dehnkörperversuch ermittelt wurde, kann nur bei einer Ausrichtung der Rovings in die Hauptzugspannungsrichtung erreicht werden. Für andere Orientierungen werden die Rovings im Riss in die Krafrichtung umgelenkt, wodurch es zu einer Abminderung der Tragfähigkeit kommt, die in den Bemessungsansätzen über entsprechende Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden muss. Um auf eine solche Abminderung an den höchstbeanspruchten Stellen am Schalenrand verzichten zu können, sieht das Bewehrungskonzept der Textilbetonschale vor, die Bewehrungslagen in diesem Bereich ausschließlich parallel zum Schalenrand anzuordnen, so dass alle 12 Lagen in ihrer Haupttragrichtung beansprucht werden und optimal ausgenutzt werden können. Aus baupraktischer Sicht ist es bei dem hohen erforderlichen Bewehrungsgrad nicht mehr möglich, die Bewehrungslagen mit einem Überlappungsstoß auszuführen, da hierdurch in den Kreuzungspunkten der Bewehrungslagen aufgrund der geringen Bauteildicke keine ausreichende Betonüberdeckung mehr gegeben wäre. Hinsichtlich der Krafteinleitung und des Verbundes würden diese Bereiche unzulässige Fehlstellen darstellen. Das Bewehrungskonzept sieht daher vor, die Textilien in einer Bewehrungslage ausschließlich stumpf zu stoßen. Die Stöße werden in den zwölf Bewehrungslagen jeweils versetzt zur darüber und darunter liegenden Lage angeordnet. Insgesamt kommen dabei sechs verschiedene Bahnbreiten zum Einsatz (21 cm, 40 cm, 61,5 cm, 83 cm, 102 cm und 123 cm). Auf Stöße an den höchstbelasteten Stellen am Schalenrand wird vollständig verzichtet. Die einzelnen Bahnen werden, wie

in Bild 4 schematisch dargestellt, in Längsrichtung bündig aneinander ausgerichtet, wodurch infolge der Bauteilkrümmung am Ende der Bahnen ein Versatz der Bewehrung von wenigen Zentimetern entsteht. Die fehlende Bewehrung im Bereich der Stöße wird durch die restlichen Bewehrungslagen kompensiert.

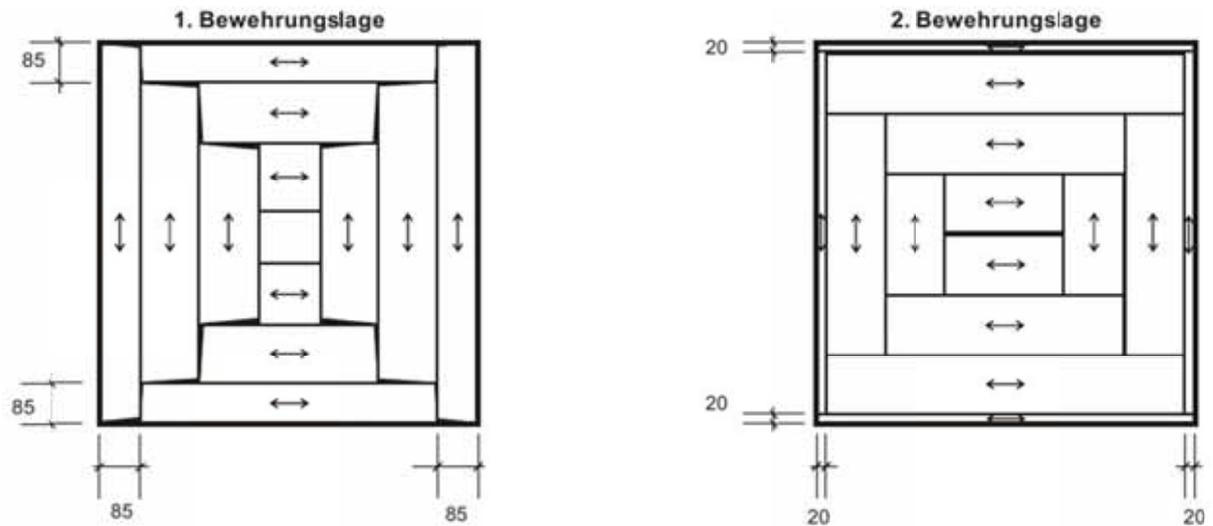


Bild 4: Schematische Anordnung der textilen Bewehrung für einen Schirm ($7 \times 7 \text{ m}^2$) exemplarisch für die 1. und 2. Lage in der Draufsicht [cm]

Fig. 4: Scheme of the 1st and 2nd textile reinforcement layer of one hyper-shell ($7 \text{ by } 7 \text{ m}^2$) [cm]

2.2.3 Herstellung

Zur Überprüfung der Handhabbarkeit bei der Produktion eines HP-Schirms wurde ein $2 \times 2 \text{ m}^2$ großer Ausschnitt hergestellt. Der Ausschnitt umfasste sowohl einen Bereich mit größerer als auch mit geringerer Steigung jedoch ohne Neigungswechsel. Die Dicke des Ausschnitts lag zwischen 60 mm bis hin zu 150 mm. Der hergestellte Ausschnitt ist in Bild 5 dargestellt.

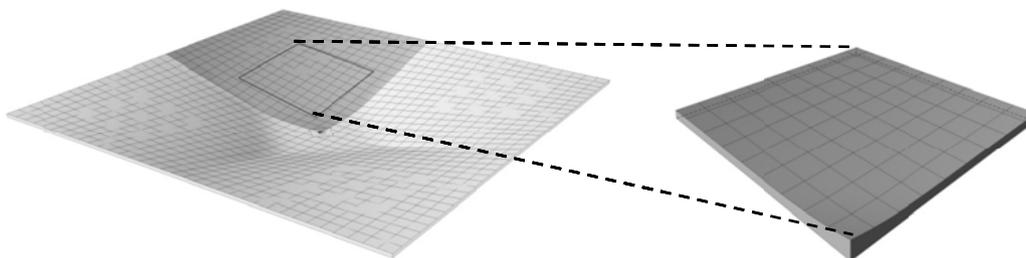


Bild 5: Schalenausschnitt $2 \times 2 \text{ m}^2$

Fig. 5: Cutout of the shell $2 \text{ by } 2 \text{ m}^2$

Für die Herstellung wurde eine spritzfähige Feinbetonmischung mit einem Kurzfasergehalt (AR-Glas, 6 mm) von 0,5 Vol% und das Carbon-Textil 2D-04-11 verwendet. Die festen Ausgangsstoffe des Feinbetons, Zement, Flugasche, Silikastaub und Gesteinskörnung, wurden als Trockenmischung vom Trockenmörtelwerk vorgemischt angeliefert. Die Schalung wurde aus mit Phenolharz beschichteten Schaltafeln gefertigt. Die Fugen der Sichtfläche wurden mit Spachtelmasse verschlossen. Auf einem Teil der Schalung wurde eine Folie aufgeklebt. Diese sollte die Schalungshaftung und somit die Belastung beim Ausschalen des Bauteils minimieren. Die Carbon-Textilien wurden für diesen Spritzversuch vorkonfektioniert. Dabei wurden die Bewehrungslagen wie in Originalgröße angeordnet. Das Spritzen des Feinbetons sowie das Einlegen der Bewehrung konnte bei der Herstellung des Schirmausschnitts gut nachgestellt und getestet werden. Es stellte sich allerdings heraus, dass bedingt durch die Neigung des Schirms der Beton ab einer Dicke von ca. 40 mm ein zu hohes Gewicht aufweist und auf der glatten Schalung nicht haften bleibt, sondern etwas rutscht. Der Schirmausschnitt wurde im erhärteten Zustand zersägt, wodurch der Querschnitt der Konstruktion erkennbar wurde.



(a) Aufspritzen der ersten Lage Beton
(a) Spraying the first concrete layer

(b) Einlegen der Bewehrung
(b) Lay-up of the reinforcement

(c) Andrücken der Bewehrung
(c) Pressing on of the reinforcement

Bild 6: Herstellung des Schalenausschnitts

Fig. 6: Production of a cutout of the shell

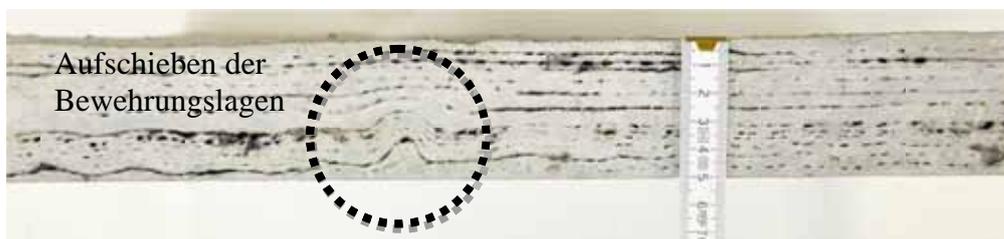


Bild 7: Lagenverteilung der Bewehrung im Bauteilquerschnitt [cm]

Fig. 7: Distribution of reinforcement layers (element cross section) [cm]

Bild 7 zeigt, dass sich die Textillagen sehr gleichmäßig über den Querschnitt verteilen. Die Schichtdicken können demnach sehr gut ausgeführt werden. Allerdings ist das Aufschieben bzw. Abrutschen der Konstruktion ebenfalls erkennbar. Um diesen Effekt bei der Herstellung eines $7 \times 7 \text{ m}^2$ großen monolithischen Schirms zu vermeiden, muss entweder eine saugfähigere Schalhaut verwendet werden oder die Konsistenz des Betons über den Fließmittelgehalt steifer eingestellt werden.

2.2.4 Bauteildurchbildung und Gestalt

Bei der Formgebung der Schirmschalen hat das Tragverhalten den größten Einfluss auf die Gestalt. Daneben spielen jedoch auch Aspekte der Herstellung und der Bauteilfügung eine Rolle. Die deutliche Querschnittsverdickung in der Mitte der Schalenbauteile ist auch notwendig um die doppelte Dachentwässerung und die Verbindungsmittel (Gewindestangen M30) zu integrieren. Darüber hinaus ist die gewählte Form der HP-Schalen günstig, da die umlaufend geraden Bauteilränder eine einfache Montage von Fassadenbauteilen und die Koppelung der Schalen untereinander ermöglichen. In Bild 8 ist der Querschnitt eines Schirms über die Diagonale mit der Querschnittsveränderung von 6 cm am Rand auf 31 cm in der Mitte dargestellt.

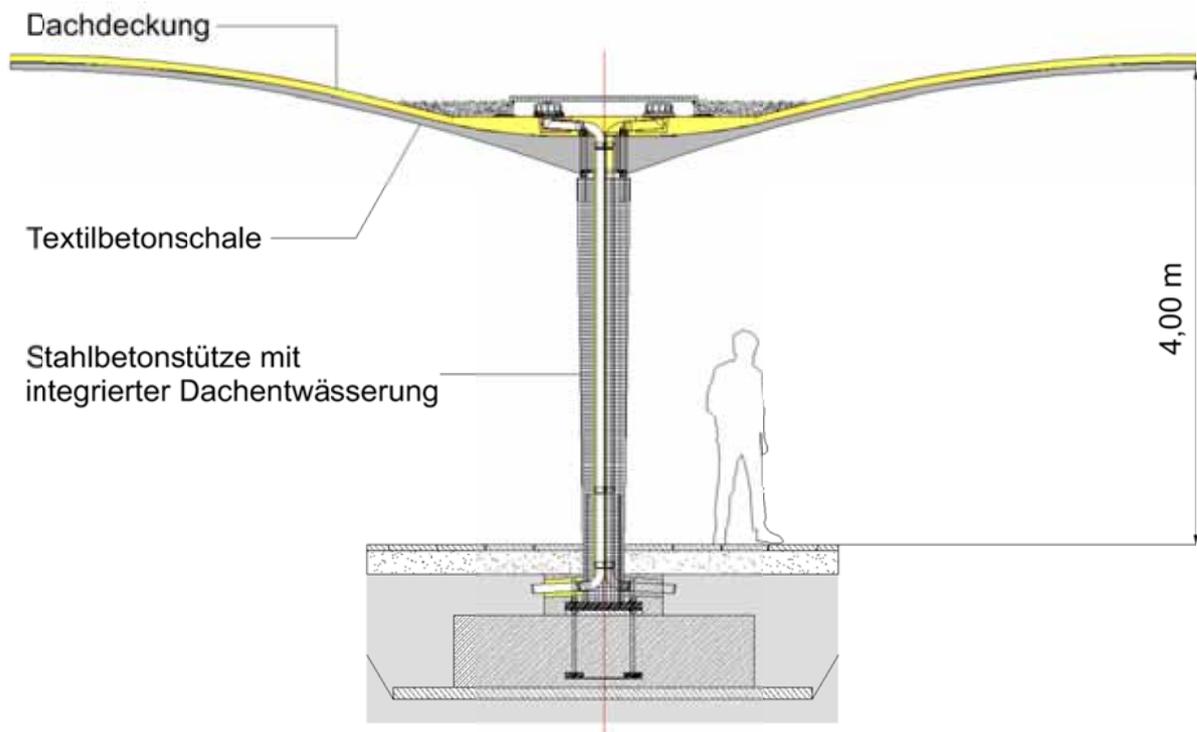


Bild 8: Querschnitt (diagonal) Schirmschale und Stütze

Fig. 8: Cross section (diagonal) of the shell and the column

2.2.5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Planung des beschriebenen Demonstrators konnte nachgewiesen werden, dass neben den zahlreichen Anwendungen im Bereich der Gebäudehüllen auch Tragstrukturen, insbesondere solche mit komplexer Strukturform, mit Textilbeton denkbar sind. Dabei erlauben Schalentragwerke eine sehr gute Ausnutzung der mit Textilbeton möglichen Dünnwandigkeit der Bauteile. Der Nachweis der Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion und der Tauglichkeit der Bauweise wurde im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall erbracht. Die Umsetzbarkeit des Bewehrungskonzepts konnte mit der Herstellung des Schalenausschnitts nachgewiesen werden. Ob die entwickelten Herstellungs- und Fügemethoden in die Baupraxis und damit in größere Maßstäbe übertragbar sind wird der geplante Bau des Demonstrators zeigen.

3 Gitterschalen aus Textilbeton

Das vorgenannte Beispiel zeigt, dass aufgrund der Eigenschaften der textilen Bewehrung eine der wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten für Textilbeton im Bereich der flächenaktiven Tragwerke liegt. Das untersuchte Tragsystem verfügt über eine Strukturform, die einen materialgerechten Einsatz des Verbundwerkstoffs erlaubt. Dennoch bleibt festzustellen, dass derartige Strukturen nicht immer den inneren Zusammenhang zwischen Bauteilgestalt, Art der Belastung und Herstellungstechnik nach außen sichtbar werden lassen. So bilden die Flächentragwerke die Dünnwandigkeit ihrer Bauteile meist nur an den Rändern ab. Der restliche Querschnittsverlauf bleibt dem Betrachter verborgen. Die Schlankheit der Konstruktion wird hier somit nicht zum entscheidenden architektonischen Ausdrucksmittel, sondern eher die plastische Formbarkeit des Materials, die eine Krümmung von Oberflächen in nahezu beliebiger Form erlaubt.

Anders ist dies bei aufgelösten Tragstrukturen, bei denen die Kräfte nicht über die Fläche sondern über ein Netz von stabförmigen Bauteilen abgeleitet werden. Hier ist die Anwendung von Textilbeton bei Gitterschalen sinnvoll, da der architektonische Eindruck zu allererst von der Schlankheit der Bauglieder geprägt wird. Ganz unmittelbar wird hier die häufig postulierte Filigranität von Textilbetonkonstruktionen sichtbar und führt zu Erscheinungsformen, die mit Beton üblicherweise nicht in Verbindung gebracht werden. Und schließlich sind bei Gitterstrukturen aus Textilbeton im Gegensatz zu Schalen die Fügepunkte ablesbar und damit gestalterisch prägnant.

3.1 Teilungsmuster von Gitterschalen mit Kugelgeometrie

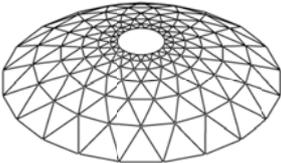
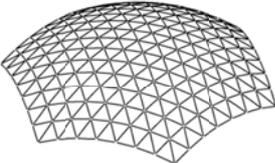
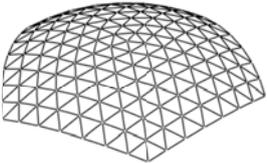
Die geometrischen Möglichkeiten, doppelt gekrümmte Flächen zu erzeugen sind derart zahlreich, dass hier exemplarisch nur Kugeloberflächen betrachtet werden sollen. Darüber hinaus bietet die Einschränkung auf Kugeloberflächen, d.h. auf Stabnetze, deren Struktur einen Ausschnitt einer Kugeloberfläche beschreibt, die Möglichkeit, Tragsysteme zu erzeugen, die im affinen Lastzustand (Eigengewicht) nahezu ausschließlich auf Druck beansprucht werden und somit den Materialeigenschaften der sehr druckfesten Betonmatrix entgegen kommen.

In Abhängigkeit von der gewählten Teilungsart bieten sich verschiedene Bauteilgeometrien an, mit denen die Gitterstruktur erzeugt wird. So lassen sich Ringnetzkuuppeln beispielsweise aus vorgefertigten Dreieckselementen herstellen, da die Aufteilung in Ringe eine relativ hohe Wiederholungsrate ermöglicht [3], [4]. Bei der Rostschale kommt es aufgrund der Projektion eines Dreiecksrasters auf die Kugeloberfläche zu einer Verzerrung zu den Rändern hin. Hier können eher Y-förmige Elemente eingesetzt werden, die in den Dreiecksfeldern der Rostschale positioniert werden. Trotz der großen Anzahl unterschiedlicher Dreiecksfelder und somit unterschiedlicher Y-Elemente können diese mit geringem Schalungsaufwand hergestellt werden (siehe Abschnitt 3.1.2). Bei den geodätischen Kuppeln schließlich wird durch die Erzeugungsmethode eine kleine Anzahl unterschiedlicher Stablängen erreicht, so dass hier mit Einzelstäben und entsprechenden Knotenelementen gearbeitet werden kann. Die drei Systeme sind in Tabelle 1 dargestellt.

Der Verwendung verschiedener Bauteile bei bestimmten geometrischen Randbedingungen führt zwangsläufig zu unterschiedlichen Fügekonzepten, die im Folgenden exemplarisch dargestellt werden.

Tabelle 1: Teilungsmuster und Bauteilgeometrien für Gitterschalen

Table 1: Tiling patterns and element geometries of grid-shells

	Kugel (Ringnetz)	Kugel (Rostschale)	Kugel (geodätisch)
Bauteile	 Dreiecke	 Y-Elemente	 Einzelstäbe

3.1.1 Ringnetzkupeel - Bauteilgeometrie und Fügekonzept

Die Verwendung von Dreiecksbauteilen hat den Vorteil, bereits in der Vorfertigung drei Stäbe zu einem Bauteil verbinden zu können und somit die Komplexität der Knotendurchbildung zu reduzieren. Die Verwendung von geschlossenen Dreieckselementen macht die Einführung eines Knotenelements zwingend notwendig.

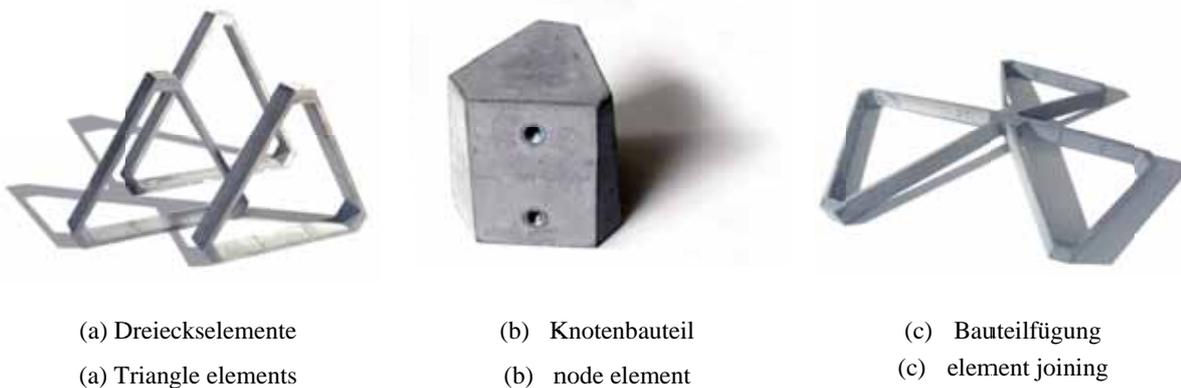


Bild 9: Dreieckselemente, Knotenbauteil und Fügung

Fig. 9: Triangle elements, knode element and connection

Um einen möglichst homogenen Eindruck der Gesamtstruktur zu erzielen wurden sowohl die Dreieckselemente als auch das Knotenbauteil aus Beton hergestellt. Die Dreieckselemente haben Kantenlängen von 80 cm und 100 cm. Die Schenkel verfügen über einen Querschnitt von 150 x 30 mm². In Bild 9 sind die Bauteile, das Knotenelement und die Fügung dargestellt.

Die Verbindung der Bauteile mit dem Knoten erfolgt durch Schraubbolzen. Im Knotenelement sind entsprechende Gewindehülsen einbetoniert. Die Ecken der Dreieckselemente sind auf 60 mm aufgedickt, so dass dort die Verbindungsmittel integriert werden können und an den Außenseiten abgeflacht, so dass ein stumpfer Stoß zum Knotenelement ermöglicht wird.

3.1.2 Rostschale - Bauteilgeometrie und Fügekonzept

Die geometrischen Erzeugungsprinzipien und strukturellen Eigenschaften von Rostschalen sind bei [3] und [4] näher beschrieben. Die starken Verzerrungen des projizierten Dreiecksrasters an den Rändern von Rostschalen lassen den Einsatz von Y-förmigen Bauteilen sinnvoll erscheinen. Durch Konstruktion des 1.Fermatpunktes in den Dreiecksflächen der Rostschale lassen sich Y-Elemente mit Innenwinkeln von $\gamma = 120^\circ$ so auf der Kugeloberfläche platzieren, dass die Elemente sich lediglich in ihren Schenkellängen unterscheiden [5]

(Bild 10). Damit ist eine wirtschaftliche Herstellung möglich. Die Fügung muss auch hier wie bei der Ringnetzkupele durch ein Knotenelement erfolgen. Aufgrund des stehend rechteckigen Querschnitts der Bauteilschenkel kann die Fügung als zweischnittige Verbindung ausgeführt werden. Auch für dieses Strukturkonzept wurden Prototypen für Bauteile und Knotenelemente hergestellt (siehe Bild 11).

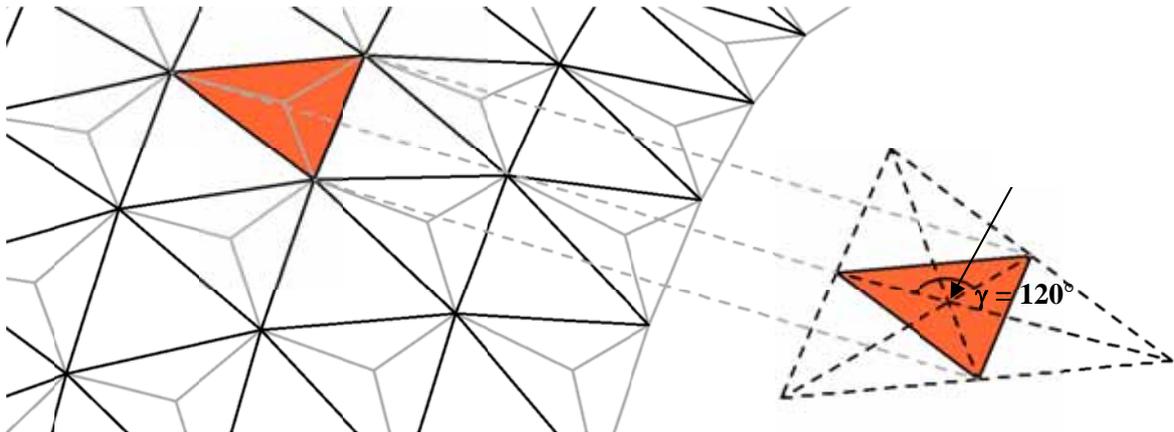
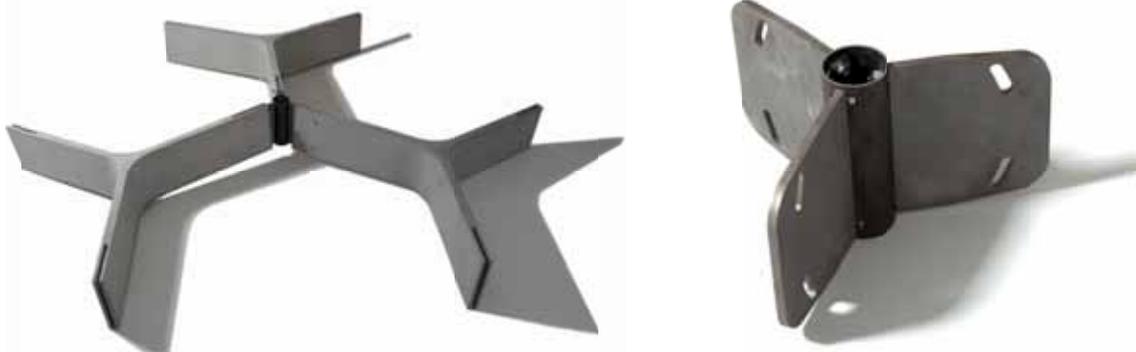


Bild 10: Ausschnitt Rostschale und Konstruktion des 1. Fermat-Punkt

Fig. 10: Cutout of a hexagonal lamella dome and construction of the 1st Fermat point

Als Knotenelement wird hier ein Stahlrohr mit angeschlossenen Verbindungsblechen verwendet. Die Textilbetonelemente weisen an den Schenkelenden entsprechende Aussparungen zur Aufnahme der Bleche auf. Jeweils zwei Schrauben M12 dienen als Verbindungsmittel.



(a) Bauteilfügung der Y-Elemente

(a) Joining of Y-shaped elements

(b) Knotenelement

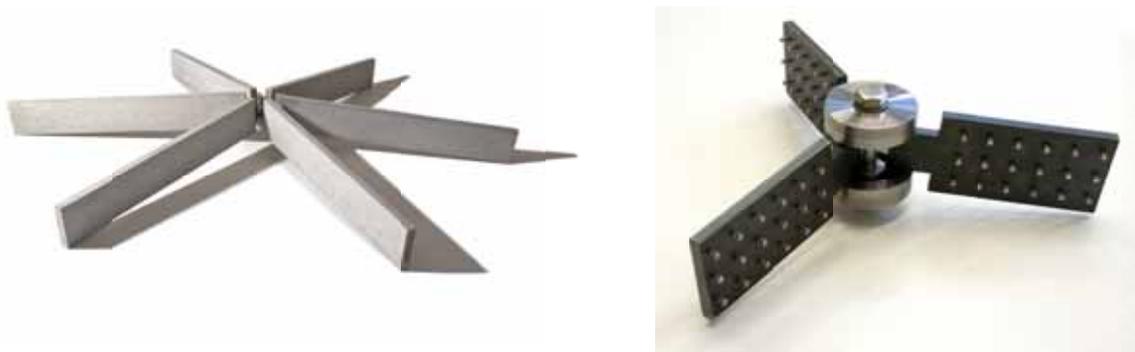
(b) node element

Bild 11: Bauteilfügung von Y-Elementen

Fig. 11: Joining of Y-shaped elements

3.1.3 Geodätische Kuppel - Bauteilgeometrie und Fügekonzept

Geodätische Kuppeln basieren auf der Teilung der Kugeloberfläche in Dreiecke, wodurch sich in einem Knotenpunkt jeweils 6 Kanten treffen [3], [4]. Die Kanten unterscheiden sich in ihrer Länge, stehen jedoch in den Knoten immer im selben Winkel zueinander, der durch den Radius der Kugel bestimmt wird. Diese Tatsache hat sich bereits Walter Bauersfeld bei der Konstruktion einer geodätischen Kuppel für das Planetarium der Fa. Zeiss in Jena zu Nutze gemacht [6]. Er entwickelte für das Stabnetz einen Knoten aus zwei kreisrunden Tellern mit jeweils einer Nut zur Aufnahme der hammerkopfförmigen Stabenden. Durch den unterschiedlich großen Radius der Nut im oberen und unteren Teller wurde der durch den Kugelradius definierte Knickwinkel der Stabkonstruktion sichergestellt.



(a) Bauteilfügung der Textilbetonstäbe

(a) Joining of TRC-bars

(b) Knotenelement mit Stahleinbauteilen

(b) node element and steel inlays

Bild 12: Geodätische Kuppel: Bauteilfügung von Einzelstäben

Fig. 12: Geodesic dome: joining of single bars

In Anlehnung an dieses Prinzip wurde ein ähnliches Knotenelement für Textilbetonstäbe mit einem stehend rechteckigen Querschnitt von $30 \times 220 \text{ mm}^2$ entwickelt. Um den Anschluss der Stäbe an den Knoten zu ermöglichen wurde in die Stäbe ein Stahleinbauteil integriert, dessen hammerkopfförmiges Ende in den Knoten eingreift. Aufgrund negativer Erfahrungen mit einbetonierten Lochblechen zur Kraftübertragung von stabförmigen Textilbetonbauteilen in Knotenelemente oder Nachbarbauteile [7] wurde hier ein Flachstahl mit beidseitig aufgetragenen Minikopfbolzen in Form von Schrauben M3 als Verbindungsmittel gewählt. Durch die Kopfbolzen sollte zum einen eine Kraftübertragung aus dem Verbundquerschnitt in den Knoten gewährleistet werden und zum anderen ein Aufspalten der Profile, wie es bei den Lochblechen beobachtet wurde, verhindert werden. In Bild 12 sind die Bauteilfügung und das entsprechende Knotenelement dargestellt.

4 Ausblick

Die Beispiele für doppelt gekrümmte Strukturen zeigen das Potenzial und die Umsetzbarkeit komplexerer Tragsysteme aus Textilbeton. Wesentliche Fragen der Konstruktion, Herstellung und Montage aber auch des architektonischen Erscheinungsbildes konnten untersucht und beantwortet werden. Allerdings verweisen die Beispiele auch auf weiteren Forschungsbedarf. So sind insbesondere für die Herstellung von monolithischen Schalen wirtschaftlichere Produktionsmethoden zu entwickeln, um die Bauweise marktfähig zu machen. Bei den Gitterschalen sind weitere Untersuchungen zu Teilungsmustern und Bauteilfügung notwendig um den Schalungsaufwand für derartige Strukturen zu verringern. Insgesamt jedoch leisten die entwickelten Systeme aufgrund ihres sparsamen Materialeinsatzes einen echten Beitrag bei der nachhaltigen Verwendung von Beton.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“.

6 Literatur

- [1] FABER, C.: *Candela / The Shell Builder*, New York, 1963.
- [2] RAMM, E.; SCHUNCK, E. (EDS.): *Heinz Isler, Schalen*, 3rd ed., 2002.
- [3] MAKOWSKI, Z.S.: *Räumliche Tragwerke aus Stahl*, S.110 ff., Düsseldorf, 1963.
- [4] ENGEL, H.: *Tragsysteme - Structure Systems*, S. 152 – 155, Ostfildern, 1997.
- [5] SCHÄTZKE, C., JOACHIM, T., SCHNEIDER, H.N., WIESCHOLLEK, M, PAK, D., FELDMANN, M.: *Single and Double-Curved Structures made of TRC*. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete*, September 6-8, 2010, Aachen, D. Place. RILEM Publications S.A.R.L., pp. 367-379.
- [6] GÜNSCHEL, G.: *Große Konstrukteure – Freyssinet, Maillart, Dischinger, Finsterwalder*, S. 160-163, Frankfurt a.M., Berlin, 1966.
- [7] SCHNEIDER, H.N.; SCHÄTZKE, C.; BERGMANN, I.: *Textile Reinforced Concrete - Applications and Prototypes*. In: HEGGER, J.; BRAMESHUBER, W.; WILL, N.(Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete - 1st International RILEM Conference on Textile reinforced Concrete*, 6./7. September, 2006, Aachen, D. Bagnaux, F: RILEM Publications S.A.R.L., 2006, S. 297 - 307.