

# Montage der Dacherweiterung der Mercedes-Benz Arena in Stuttgart

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Joachim Scheer zur Vollendung des 85. Lebensjahres gewidmet

T. Schween, D. Schlarmann, U. Heiland, D. Kiehn

**Zusammenfassung** Die Mercedes-Benz Arena in Stuttgart wurde von 2009 bis 2011 von einem Leichtathletik- in ein reines Fußballstadion umgebaut. Dazu wurden die Tribünen der Kurven neu errichtet und näher an das tiefer gelegte Spielfeld herangeführt. Zum Schutz der untersten Zuschauerreihen wurde das bestehende Membrandach um 6 m bis 15 m nach innen verbreitert. Ungewöhnlich daran ist, dass das neue, seilabgespannte Membrandach auf dem inneren Seilring eines vorhandenen, seilabgespannten Membrandachs aufgesetzt. Im vorliegenden Beitrag wird über die Montage und deren Begleitung aus statischer Sicht berichtet.



Bild 1. Aufnahme des Stadions nach Fertigstellung  
Fig. 1. Photograph of the roof after conversion

## Erection procedure of a roof broadening at Mercedes-Benz Arena in Stuttgart

**Abstract** Since 2009, the Mercedes-Benz Arena has been rebuilt from a multi purpose stadium into a pure football arena. Stands have been renewed and widened down to the pitch. Hence, the roof of the stands had to be extended between 6 m to 15 m to cover the new first rows. It should be noted, that the new cable stayed roof extension has been erected onto the inner ring of an itself suspended membrane roof system. The erection procedure and its structural analysis are reported below.

### 1 Einleitung

Im Zuge des zwei Jahre dauernden Stadionumbaus wurden die vorhandenen Tribünen in den Kurven vollständig durch neue ersetzt. Die Anzahl der Tribünenplätze erhöhte sich von 56000 auf 60450 Plätze. Unterhalb der Osttribüne entstand zusätzlich eine Sporthalle für Handball- und Basketballspiele. Um den Witterungsschutz für die Zuschauer zu verbessern, wurde das bestehende Membrandach des Stadi-

ons zwischen 6 m bis 15 m nach innen verbreitert (Bild 1). Dazu wurde ein neues Seiltragwerk mit dem aus dem Jahre 1995 vorhandenen Seiltragwerk verknüpft. Die hier beschriebene Montage dieser Dacherweiterung war zeitgleich mit der Cannstatter Kurve zu Beginn der Saison 2011/2012 fertigzustellen.

### 2 Beschreibung des Tragwerkes

Die primäre Tragkonstruktion des bestehenden Dachtragwerkes der Mercedes-Benz Arena folgt dem Prinzip des Speichenrads. Hierbei werden durch die vorgespannten, radialen Seile (= Speichen) die Lasten aus der Dachfläche zum Druckring (= Felge) übertragen. Die Entwicklung des Konstruktionsprinzips und der Übergang zum hier vorliegenden umgekehrten Speichenrad mit zwei Druckringen und einem inneren Ringseil wird von Bergermann und Göppert [1] beschrieben.

Insgesamt 40 Seilbinder spannen und tragen das innere Ringseil. Jeder Seilbinder besteht aus dem oberen Tragseil und dem unteren Spannseil sowie den dazwischen angeordneten Hängern (Bild 2). Die Druckringe aus geschweißten Stahl-Hohlprofilen sind in den Binderachsen auf Stützen aus ebenfalls stählernen Kastenquerschnitten gelagert. Vervollständigt wird das Tragwerk durch vier zweiteilige Windverbände und die flach gegründeten Fundamente. Das Sekundärtragwerk der Dacheindeckung wird durch Membranfelder aus PVC-PES (Polyvinylchlorid Polyester) und den sie stützenden Bögen aus Stahlrohren gebildet.

Zur Erweiterung der Dachkonstruktion wurden die Seilbinder nach innen verlängert. Hierfür wurden an den Gussknoten des vorhandenen inneren Ringseiles neue Luftstützen angeordnet, die die neuen Seilbinder aufspannen (Bild 5). Die neuen Trag- und Spannseile tragen bzw. spannen ein neues inneres Ringseil. Die Verbindung zum oberen Druckring erfolgt durch neue, zusätzliche Rückspannseile. Die neuen inneren Seilbinder liegen nicht in der Flucht der be-

Dr.-Ing. Tobias Schween

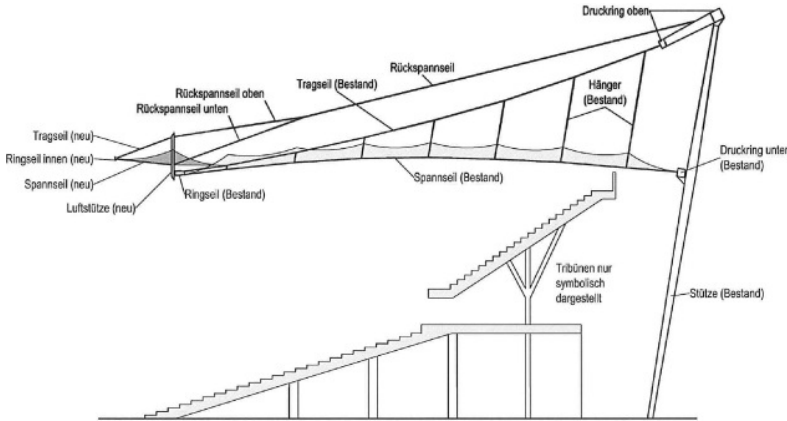
M.Sc. Dipl.-Ing. Dirk Schlarmann

Ingenieurgemeinschaft Thor-Schipper-Schween  
Neuer Markt 4  
49393 Lohne  
info@tss-ingenieure.de

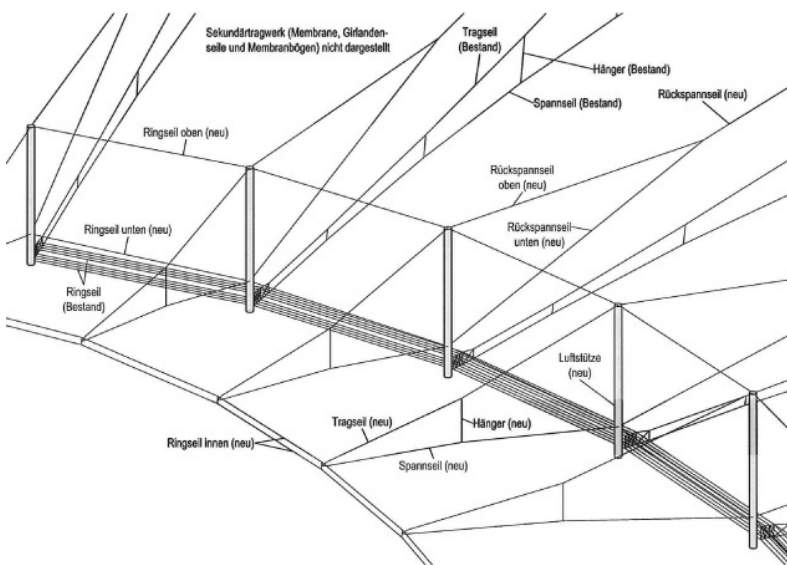
Dipl.-Ing. Uwe Heiland, Geschäftsführer

Dipl.-Ing. Diethard Kiehn

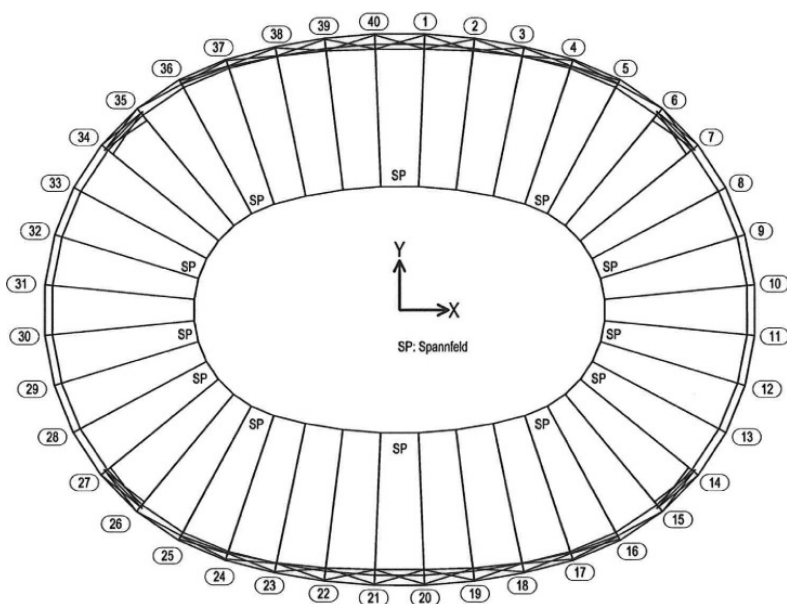
Eiffel Deutschland Stahltechnologie GmbH  
Hackethalstraße 4  
30179 Hannover  
info@eiffel.eiffage.de



**Bild 2. Skizze der Seilbinder**  
Fig. 2. Sketch of the cable truss beam



**Bild 3. Isometrische Darstellung der neuen und vorhandenen Bauteile**  
Fig. 3. Isometric image of new and present structural members



**Bild 4. Einteilung der Regel- und Spannfelder (SP) bei der Montage der oberen und unteren Luftstützen-Ringseile**  
Fig. 4. Regular and tension partition (SP) distribution while mounting upper and lower cable ring of the truss members

stehenden Binder sondern knicken im Grundriss an der Luftstütze ab. In Umfangsrichtung verbinden zusätzliche obere und untere Ringseile die Luftstützen zur Stabilisierung und zur Aufnahme der Umlenkräfte. Die Verbindung zwischen bestehendem und neuem Seiltragwerk erfolgt über je eine Bolzenverbindung zwischen Luftstütze und vorhandenem Ringseil-Gussknoten. Die Dacherweiterung wird ebenfalls durch Membranfelder und stützende Stahlbögen bekleidet. Durch die Erweiterung erhöht sich die Beanspruchung insbesondere des oberen, äußeren Druckringes. In den Kurvenbereichen wurde dieser durch aufgeschweißte Blechquerschnitte verstärkt. Weiterhin wurde in einigen Windverbänden der Austausch der Verbandsseile gegen größere Querschnitte erforderlich.

### 3 Montageablauf im Überblick

Bei der Planung und Durchführung der Montage der Dacherweiterung war zu berücksichtigen, dass der Spielbetrieb der Fußball-Bundesliga aufrecht erhalten werden musste. Somit stand für längerfristige Arbeiten im Innenraum, wie z. B. das Auslegen des inneren Seiltragwerks, nur die Sommerpause 2011 zur Verfügung. Nachfolgend wird der Bauablauf vorgestellt und besonders interessante Aspekte näher beschrieben.

Zunächst wurden die Verstärkungsmaßnahmen am oberen Druckring durchgeführt. Als Witterschutz und Arbeitsebene wurden speziell gefertigte Einhausungen am Druckring verwendet, so dass die Flachbleche abschnittsweise zuverlässig verschweißt werden konnten.

Anschließend wurden die Verbandsauskrenzungen der drei oberen Felder zwischen den Achsen 6/7, 14/15 und 26/27 sowie die oberen Verbandsseile von Achse 35 Mitte nach Achse 34 oben und die unteren Verbandsseile von Achse 35 unten nach Achse 34 Mitte ausgetauscht. Dazu wurden auch Verstärkungsmaßnahmen an den Verbandsanschlüssen und den Verbandspfosten durchführt. Neben dem Austausch der alten Seile gegen neuere mit größerem Querschnitt war auch eine Änderung der Vorspannung im gesamten Verbandssystem vorgesehen [2].

Nach Abschluss der Arbeiten an den äußeren Druckringen und Verbänden begann der Aufbau der Luftstützen und deren oberer Ringseile auf dem vorhandenen Seilring. Die insgesamt 40 Felder zwischen den Luftstützen wurden in 28 Regelfelder und 12 Spannfelder (**Bild 4**) eingeteilt. In maximal vier zusammenhängenden Regelfeldern wurden obere Ringseile zwischen den Luftstützen montiert und in den Spannfeldern durch vertikale Hilfsverbände in tangentialer Richtung gespannt (**Bild 5**). Die Anzahl der erforderlichen Spannfelder ergab sich aus der begrenzten Rotationskapazität der Bolzenverbindungen zwischen den Luftstützen und den vorhandenen Gussknoten. Auf das Zusammenspiel zwischen diesem Anschluss und dem Spannkonzept wird in Abschnitt 5.1 näher

her eingegangen. Das Spannen der oberen Ringseile erfolgte in vier Gruppen mit Hilfe von Kettenzügen.

Vor dem Einbau der unteren Ringseile waren in den Spannfeldern zunächst Hilfsverbände am Fuß der Luftstützen anzubringen. Das Spannkonzzept sah auch hier eine Einteilung in vier Gruppen vor. Das Spannen erfolgte in drei Umläufen, in denen die Seile schrittweise gespannt werden mussten. Parallel zu den Arbeiten an den unteren Luftstützen-Ringseilen wurden bereits die ersten Rückspannseile am Druckring und am Luftstützenkopf eingehängt. Durch den Anschluss des unteren Arms der Rückspannseile an die Luftstützenfüße (Bild 5) erfolgte der eigentliche Spannvorgang.

Das neue, innere Seiltragwerk aus Trag-, Spann- und Ringseilen mitsamt neuer Ringseilknoten wurde im Stadioninnenraum ausgelegt und verschraubt. Jedes Trageisil wurde über Hilfsseile und manuell betriebene Greifzüge mit dem passenden Luftstützenkopf verbunden. Nach dem Hubvorgang und dem Einsetzen der Bolzen im Gabelkopf (im Folgenden kurz *Einbolzen*) der Tragseile am Luftstützenkopf konnte das innere Seiltragwerk gespannt werden. Das Spannen erfolgte durch den Anschluss der neuen Spannseile an die Luftstützenfüße. Die Besonderheiten für die Montage des inneren Seiltragwerks werden im Abschnitt 5 weiter beschrieben.

Mit dem Einbolzen des letzten Spannseils war die tragende Konstruktion des Seiltragwerks vollendet und die Hilfskonstruktionen wurden abgebaut. Den Abschluss der Arbeiten an der Dachweiterung bildete die Montage der Membranbögen und der Membranfelder.

#### 4 Verstärkungsmaßnahmen am vorhandenen Tragwerk

##### 4.1 Verstärkung der Druckringe

Für die Aufnahme der zusätzlichen Lasten aus der Dachweiterung waren folgende Verstärkungsmaßnahmen durchzuführen:

- Verstärkung des Druckringes im Bereich der Kurven mit je acht Verstärkungsfeldern, Länge je ca. 20 m. Dazu erhielten die Hohlkästen ( $b \times h = 1,20 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ ) oben und unten zusätzliche Blechlamellen  $b = 1,20 \text{ m}$ ,  $t = 25 \text{ mm}$
- Anordnung von 40 Knotenblechen an den Druckringknicken für die Anschlüsse der neuen hinteren Rückspannseile
- Verstärkung der mittleren Druckriegel in den vier Vertikalverbänden, Länge je ca. 20 m. Die Hohlkästen ( $b \times h = 0,45 \text{ m} \times 0,45 \text{ m}$ ) erhielten an allen vier Seiten zusätzliche Blechlamellen  $b = 0,40 \text{ m}$ ,  $t = 8 \text{ mm}$
- Austausch der Knotenbleche am oberen Druckring und mittleren Druckriegel für die neuen Seile der Vertikalverbände

Diese Arbeiten mussten vor der Durchführung des inneren Ringseilhubes abgeschlossen sein. Die Platzverhältnisse im Umfeld des Stadions waren äußerst beengt. Zusätzlich liefen gleichzeitig zu den Verstärkungsarbeiten die Abrissarbeiten der alten Tribünen und der Rohbau der neuen Tribünen. Der Druckring liegt in einer Höhe von ca. 30 bis 40 m über

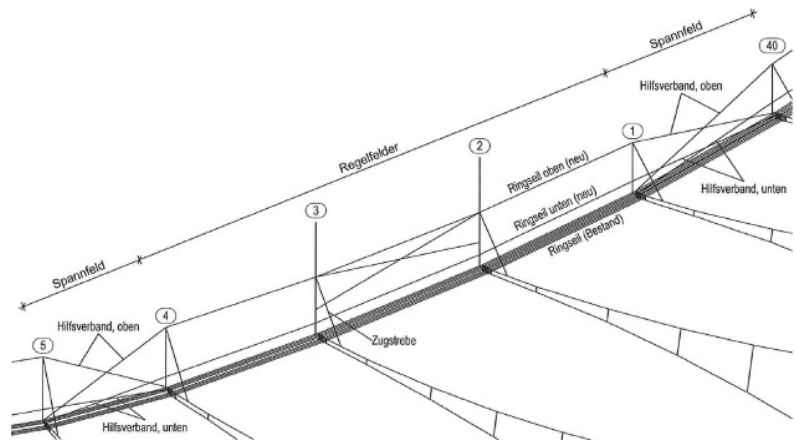


Bild 5. Aufbau der Regelfelder mit Hilfsverbänden in den Spannfeldern  
Fig. 5. Mounting of regular partitions with auxiliary bracings in the tension partitions

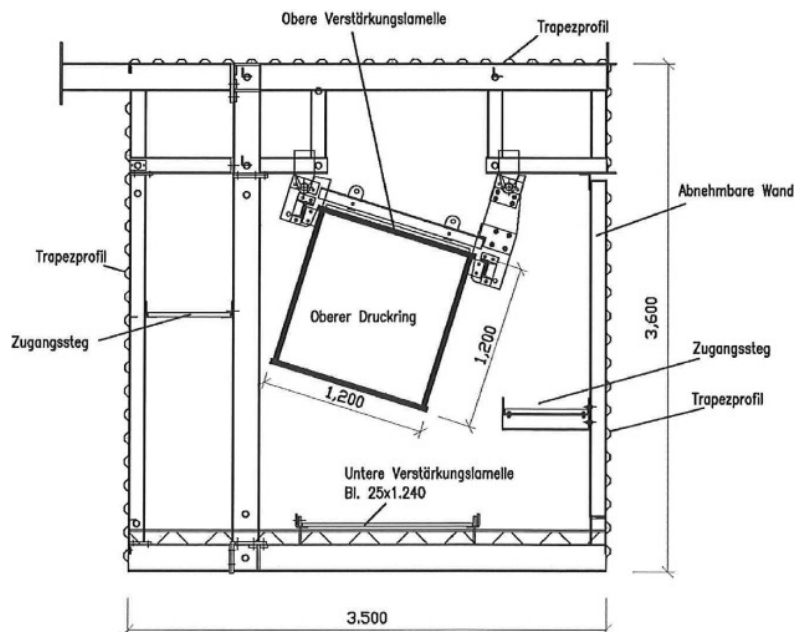


Bild 6. Querschnitt der Einhausung und Hubtraverse  
Fig. 6. Cross section of an assembly housing

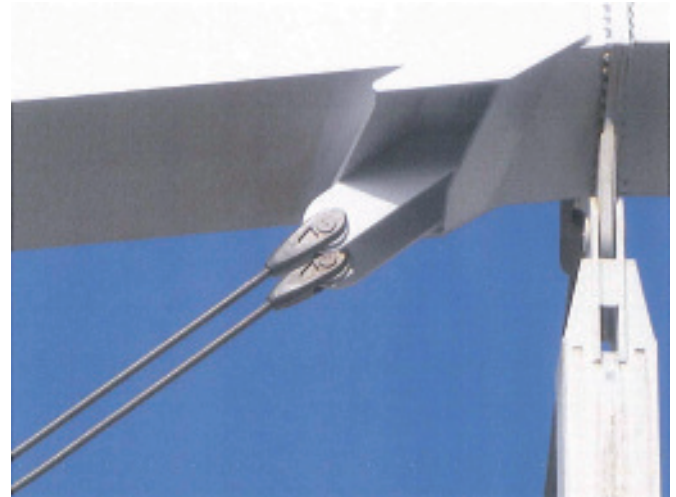
dem Terrain. Für die Montage der Verstärkungslamellen wurde eine Einhausung geplant, die zusätzlich als Hubvorrichtung der unteren Blechlamelle diente (Bild 6). Das Hubgewicht inkl. der Blechlamelle beträgt ca. 10 to. Die obere Blechlamelle wurde mit einer Traverse gehoben, die auch die erforderlichen Vorkehrungen zur Befestigung der Einhausung am Druckring besaß.

Insgesamt wurden Einhausungen für zwei Druckringfelder (Bild 7) verwendet. So konnten immer zwei Felder im Wechsel verstärkt werden. Durch den zeitlich versetzten Takt wurde der Personaleinsatz optimiert.

Jede Einhausung wurde achtmal verwendet. Um die nötige Stabilität und Robustheit zu gewährleisten, wurde eine Stahlkonstruktion mit Dach- und Wandbekleidung aus Trapezblechen gewählt. Der Fußboden bestand aus Spanplatten. Die Einhausungen waren beheizbar, damit der Korrosionsschutz in einem Zuge mit den Verstärkungen erfolgen konnte. An den Stumpfstoßen der Bleche wurden die Nähte zu 100 Prozent geprüft. Die Verstärkung eines Feldes dauerte jeweils zwei Wochen.



**Bild 7. Hub der Einhausung**  
Fig. 7. Lift of the encasement



**Bild 8. Anschluss der Vertikalverbände**  
Fig. 8. Joint of vertical bracings

#### 4.2 Austausch der Vertikalverbände

Jede Verbandsdiagonale besteht aus zwei Einzelseilen (Bild 8), so dass beim Austausch eines Seiles das andere die aussteifende Funktion des Verbandes aufrecht erhalten konnte. Für diesen Vorgang wurden reduzierte, maximal zulässige Windgeschwindigkeiten ermittelt. Der Umbau einer Ebene musste innerhalb von drei Tagen bei max. zulässiger Windstärke 8 erfolgen. Arbeitsschritte je Verbandsebene:

- Demontage der alten Seile
- Abtrennen der Knotenbleche
- Einmessen und Verschweißen der neuen Knotenbleche
- Montage der neuen Seile
- Spannen der neuen Seile

### 5 Montage der Dacherweiterung

#### 5.1 Einbau der Luftstützen, Ring- und Rückspannseile

Der Anschluss der Luftstützen an die vorhandenen Ringseilknoten erfolgt mit Hilfe einer zweischnittigen Bolzenverbindung am Luftstützenfußpunkt. In den bestehenden Gussknoten ist bereits je ein Loch  $\varnothing 54$  mm vorhanden, das für den Bolzen genutzt wird. Die Verbindung zur Luftstütze bilden zwei seitliche Flachblech-Laschen.

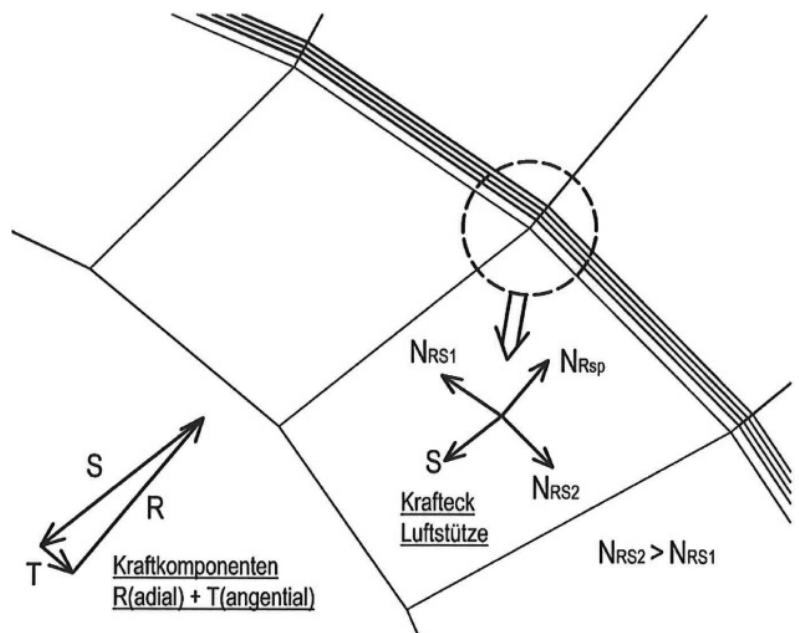
Im Endzustand verlaufen die Anschlussbleche der Luftstützen in Achsrichtung der Bestands-Seilbinder. Am unteren Seilanschlusspunkt der Luftstütze bilden die vier angreifenden Seile (zwei untere Ringseile, neues Spannseil und unteres Rückspannseil) ein zentrales Kräftesystem (Bild 9). Die Vorspannkraft  $S$  (= Umlenkraft aus dem neuen, inneren Ringseil) richtet die Luftstützen in der Flucht der bestehenden Seilbinder aus. Variable Einwirkungen aus Schnee oder Wind erzeugen aufgrund der dominierenden Vorspannung nur unwesentliche Relativverschiebungen zwischen Luftstütze und Bestandsgussknoten.

Bis zum abschließenden Spannen des neuen Seiltragwerks fehlt die Kraftkomponente aus dem unteren Spannseil. Durch die fehlende Tangentialkraft  $T$  neigen die Luftstützen zum Verschieben in Richtung der Kurven. Aufgrund des vorgesehenen Spiels in der Bolzenverbindung ist eine Verdre-

hung in begrenztem Maße möglich, jedoch ist die Rotationskapazität zu beachten. Während der Montage wurden Hilfsverbände eingesetzt, mit denen diese Verformungen gesteuert und begrenzt werden konnten.

#### 5.2 Spannen des unteren Ringseils der Luftstützen

Das untere Ringseil verläuft umlaufend zwischen den Luftstützen rund 600 mm oberhalb der Bolzenverbindung zum bestehenden Dach. Es werden vierzig einzelne Seile eingesetzt, die jeweils mit Gabelköpfen an Knotenbleche angeschlossen werden. Vorgabe vom Planer des Tragwerks war, Seile mit fixer Länge ohne Verstellmöglichkeit, jedoch mit sehr kleiner Längentoleranz zu verwenden. Demzufolge sind die Ringseile durch die geplante Vorspannung und Kriecheinflüsse kürzer als der geometrische Abstand zwischen den Luftstützen. Beim Aufbau der Regelfelder werden diese Differenzen durch die Verdrehung der Luftstützen in Verbindung mit den Hilfsverbänden aufgenommen. Dies bedeutet, dass sich die Luftstützen eines Regelfeldes im Rah-



**Bild 9. Kräftesystem am unteren Seilanschluss der Luftstütze**  
Fig. 9. System of forces at the lower cable joint of the column

men der möglichen Rotationskapazität annähern. Die Hilfsverbände begrenzen die Verformungen. Der zulässige horizontale Rotationswinkel im Bolzenanschluss der Luftstützen beträgt 100 mrad. In den Achsen 12/13 und 28/29 war der Winkel infolge höherer Beanspruchungen auf 50 mrad begrenzt. Umgerechnet bedeuten diese Winkel eine Verschiebbarkeit der Luftstützen von  $\pm 32$  mm bzw.  $\pm 16$  mm parallel zum Dachrand.

In den Spannungsfeldern wurden die Ringseile mit einem temporären Spannschloss als Verlängerung zunächst schlaff eingebaut (Bild 10). Für das Einbolzen der unteren Ringseile wurden hydraulische Pressen mit einer Kraft von 450 kN eingesetzt.

Für den Spannungsvorgang waren mehrere Umläufe vorgesehen, in denen die Vorspannung sukzessive erhöht wurde. Die zwölf Spannungsfelder wurden in vier Spanngruppen eingeteilt, wobei die Seile innerhalb einer Spanngruppe jeweils parallel bedient wurden. Das Spannen erfolgte in drei Umläufen, wobei die Seilverlängerungen in den Spannungsfeldern schrittweise verkürzt wurden, bis die Ringseile eingebolzt werden konnten.

### 5.3 Spannen der Rückspannseile

Der Einbau der Rückspannseile zur Verbindung der Luftstützen mit dem bestehenden Druckring erfolgte zunächst durch das Einhängen am Druckring und am Kopf der Luftstütze. Das Spannen geschah durch den Anschluss des unteren Arms der Rückspannseile an den Fuß der Luftstützen. Sowohl das Einhängen als auch das Spannen begann in den Kurvenscheiteln (Achsen 10/11 u. 30/31) und wurde von dort aus symmetrisch in Richtung der Geraden fortgeführt.

### 5.4 Auslegen den neuen Seile auf dem Spielfeld

Das Montagekonzept sah vor, das gesamte innere Seiltragwerk (neue Trag- und Spannseile, inneres Ringseil) am Boden auszulegen und mit den neuen Ringseilknoten zu verschrauben. Anschließend sollte das Tragwerk in allen 40 Achsen gleichzeitig gehoben werden. Im Zuge der Montageplanung sind dazu zwei verschiedene geometrische Varianten untersucht worden.

Eine erste Möglichkeit war das Auslegen des inneren Ringseils in der Position der Grundrissprojektion seiner planmäßigen Endlage. Das Ringseil wäre in einer ovalen Grundrissform ausgelegt worden. In den Geraden und Kurven wäre es über die Tribünen, in den Ecken im Bereich des Spielfeldes verlaufen. Die Form des inneren Ringseils hätte sich beim Anheben nur unwesentlich verändert. Diese Form wird nachfolgend als *freie Lage* bezeichnet.

Der zweite Ansatz bestand darin, dass Ringseil entlang des Spielfeldes auszulegen. Der Umfang des Spielfeldes ist geringer als die Länge des inneren Ringseils, daher musste das Seiltragwerk in einer Schlangenlinie ausgelegt werden. Diese Position weicht in den Geraden und Kurven von der freien Lage um mehrere Meter ab und wird daher als *Zwangslage* bezeichnet.

Ein Vergleich der beiden Varianten im Grundriss ist in Bild 11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei der freien Lage große Teile des Seiltragwerks auf den Tribünen verlaufen.



Bild 10. Temporärer Anschluss des unteren Ringseils an eine Luftstütze  
Fig. 10. Temporary connection between a lower ring cable and a column

Dabei wäre die Zugänglichkeit der Knotenpunkte eingeschränkt gewesen, was das Auslegen des Seiltragwerks erschwert hätte. Weiterhin hätten die Ringseile die Fahrwege zwischen Spielfeld und Tribüne gekreuzt, so dass hier Konflikte im Baubetrieb möglich gewesen wären.

Die Entscheidung fiel zu Gunsten der Lage am Rand des Spielfeldes (*Zwangslage*). Ausschlaggebend hierfür war zum einen, dass Bereiche zwischen Spielfeld und Tribünen weiterhin als Fahr- und Arbeitswege zur Verfügung standen und nicht durch kreuzende Seile gestört wurden. Zum anderen konnten die vorbereitenden Arbeiten auf einer ebenen Fläche ausgeführt werden. Beim Auslegen in freier Lage im Tribünenbereich wären verschiedene Hilfskonstruktionen für die Seile erforderlich gewesen. Bei der gewählten Lösung wurde jedoch die Gefahr gesehen, dass sich die ausgelegten Seile und insbesondere die schweren Knoten beim Anheben durch den Schrägzug unkontrolliert auf die freie Lage zu bewegen. Um das Seiltragwerk beim Hubvorgang in seiner Lage zu halten wurden daher Abspannungen vorgesehen, indem die jeweils gegenüberliegenden Ringseilknoten der Geraden und Kurven durch sogenannte Abspannfächer (Bild 11) gekoppelt wurden. Die Anordnung

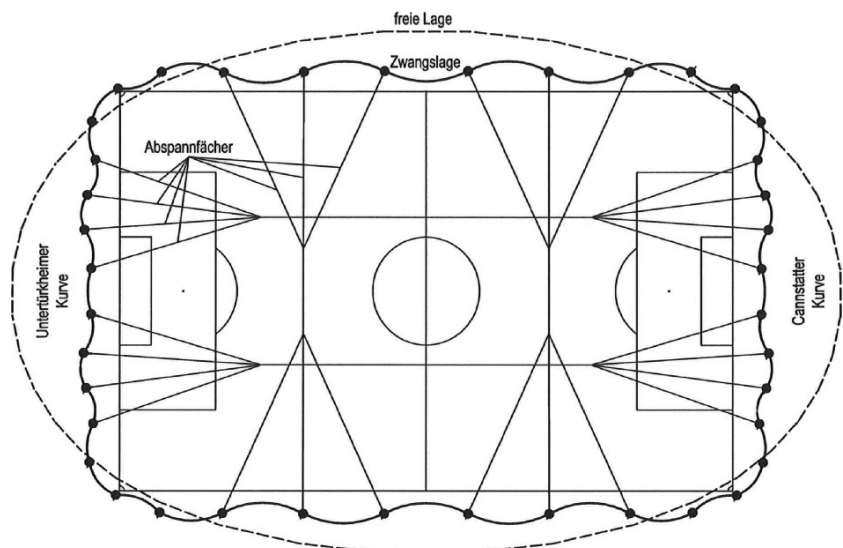


Bild 11. Vergleich des ausgelegten Seiltragwerks in freier Lage und in Zwangslage  
Fig. 11. Principal shape of the cable net on the ground with temporary guys



**Bild 12. Anheben der Knoten mit Abspannfächer**  
Fig. 12. Initial lift with temporary guys



**Bild 14. Lösen der Abspannungen**  
Fig. 14. Unlocking the temporary guys



**Bild 13. Bedienung des Greifzugs**  
Fig. 13. Handling of the rope jack



**Bild 15. Seiltragwerk im oberen Hubbereich**  
Fig. 15. Cable net lift

dieser Hilfsseile wurde im Vorfeld im Rahmen der statischen Berechnung der Montage [3] durch rechnerische Simulation des Hubvorgangs festgelegt.

## 5.5 Hubvorgang

Der Hubvorgang des inneren Seiltragwerks war der zentrale Schritt der Montage. Bei der Planung der Hubfolge waren verschiedene Randbedingungen zu beachten. Das Rutschen der Seile und der Ringseilknoten auf dem Boden war zu minimieren, damit keine Schäden am Korrosionsschutz entstehen. Die Verformungsdifferenzen zwischen zwei benachbarten Ringseilknoten waren zu begrenzen. Hierbei waren insbesondere größere Winkelverdrehungen der Ringseilknoten zu vermeiden, da diese zu unter Umständen schädlichen Torsionsbeanspruchungen in den Ringseilen führen konnten. Vorhandene Bauteile wie z. B. Brüstungen des Ordnungsgangs und die Tribünen störten den Hubweg des Seiltragwerks und mussten umgangen werden. Auch musste die vorgesehene Personalkapazität von 20 Monteuren zum Bedienen der Hubvorrichtungen berücksichtigt werden. Besondere Aufmerksamkeit bei der Berechnung galt dem Beginn des Hubs. Das Seiltragwerk musste aus seiner spannungslosen Auslegeposition auf dem Boden in eine durch die Abspannfächer gehaltene, ansonsten frei hängende Posi-

tion überführt werden. Die Interaktion zwischen den sukzessive abhebenden Seilen und dem Boden war zu berücksichtigen.

Die Kräfte in den Seilen bauten sich erst mit dem Abheben vom Boden auf, betrogen jedoch während des gesamten Hubs nur einen Bruchteil der Seilkraft des Endzustandes. Das Ringseil konnte durch geringe Kräfte in den Abspannfächern in seiner Lage gehalten werden. Den Ringseilknoten fehlten jedoch die stabilisierenden Ringseilkräfte, so dass deren Verdrehung besondere Beachtung bei der Untersuchung geschenkt werden musste.

Als Ergebnis der Berechnungen entstand eine Hubfolge in drei Phasen: In der ersten Phase erfolgte das Abheben des Seiltragwerks (**Bild 12**) und der weitere Hub bis zu einer Höhe oberhalb der Brüstung des Ordnungsgangs. In Phase zwei erfolgte der Übergang aus der gespannten Zwangslage in die ovale, freie Lage. Abgeschlossen wurde der Hub durch das weitere Ziehen des Tragwerks (Phase drei) bis zum Einbolzen der Tragseile an den Luftstützen.

Auf der Baustelle wurden für den Hubvorgang die vierzig ausgelegten, neuen Tragseile durch ca. 40 m lange Hilfsseile ( $\varnothing 20$  mm) mit den Luftstützen verbunden. Am Kopf der Luftstütze wurden diese Seile über eine Rolle umgelenkt und zum Ringseilknoten des vorhandenen Daches geführt.

Dieses Ringseil, das aus acht parallelen Einzelseilen besteht, konnte als Arbeitsebene genutzt werden, um die handbetriebenen Greifzüge beim Hub zu bedienen (**Bild 15**).

Der Seilhub in Phase 1 begann am Boden jeweils mit den drei Seilknoten der Ecken, da diese nicht durch Abspannungen gehalten waren und daher als erstes in eine stabile schwebende Lage gebracht werden sollten. Anschließend wurden die Seilknoten der Haupt- und Gegengeraden gezogen, bevor die Knotenpunkte der Kurven bedient wurden. Nach diesem Schema erfolgte der Hub schrittweise in ca. 50 cm-Takten, bis eine Höhe von 5 – 5 m erreicht war. Nennenswerte Verschiebungen der Ringseilknoten auf dem Boden wurden durch die Abspannfächer verhindert.

Nachdem eine ausreichende Höhe zum Überqueren der Brüstung des Ordnungsgangs erreicht war, konnten die Abspannfächer gelöst werden (**Bild 14**). Dies erfolgte zunächst in den Kurvenbereichen. Parallel zum Nachlassen der Abspannungen wurden die Ringseilknoten weiter nach oben gezogen, um einen ausreichenden Abstand zur Tribüne zu gewährleisten. Im Anschluss wurden die Abspannungen der Haupt- und Gegengeraden gelöst, so dass das Ringseil nun seine ovale, freie Lage einnahm.

Die dritte Phase bestand aus dem weiteren Heben (**Bild 15**) des Seiltragwerks in seine Endlage und dem abschließenden Einbolzen an der Luftstütze (**Bild 16**). Das Montagepersonal bediente die Seilzüge wechselweise an jeder zweiten Luftstütze mit Schritten von ca. 1 m. Mit dem Einbolzen der Tragseile an den Knotenblechen der Luftstützenköpfe wurde entsprechend der Arbeitsanweisung in den Eckbereichen begonnen. Mit dieser günstigen Reihenfolge reichte die Tragfähigkeit der Seilzüge von 35 kN in allen Achsen aus.

### 5.6 Spannen inneres Seiltragwerk

Das Spannen des inneren Seiltragwerks stellte den Abschluss der Seilbauarbeiten für die Dacherweiterung dar und erfolgte durch das Einbolzen der unteren Spannseile an die Knotenbleche der Luftstützenfüße. Die Spannseile wurden mit Hilfe von speziellen Traversen und Hohlzylinderpressen mit angeschlossenem Manometer gespannt.

Beim Spannen wurden immer vier Achsen zu einer Spanngruppe zusammengefasst und parallel bedient. Die Reihenfolge ergab sich aus der Montageplanung unter Berücksichtigung der erforderlichen Spannkräfte und den auftretenden Ringseilverformungen. Das Spannen begann in den Scheitelpunkten der beiden Kurven (Achsen 10, 11, 30 und 31, s. Bild 4) und wurde von dort aus symmetrisch in sieben Takten fortgesetzt. Als achte Spanngruppe wurden die Achsen 1, 20, 21 und 41 in der Mitte der Geraden vorgespannt. Von dort aus wurde der Vorgang symmetrisch in Richtung der Kurven fortgesetzt und das Spannen abgeschlossen (**Bild 17**).

### 5.7 Montage der Membranfelder

Das Membrandach besteht aus den Stahlbögen, den Primär- und den Sekundärmembranen. Die primären Membranfelder spannen über die Stahlbögen und werden am inneren und äußeren Dachrand durch Girlandenseile in Form gehalten (**Bild 18**). Die seitlichen Membranränder werden über Keder in Klemmleisten gehalten und sind mit Laschen an den Spannseilen befestigt. Die im Werk zugeschnittenen und vorkonfektionierten Membranen mit Abmessungen zwischen 15 m x 10 m und 8 m x 20 m wurden zusammen mit den Klemmleisten und Verbindungsmitteln feldweise auf das Dach gehoben (**Bild 19**). Die Membranspannung wurde



**Bild 16.** Hubvorgang abgeschlossen, Tragseil bereit zum Einbolzen  
Fig. 16. Cable net lift finished



**Bild 17.** Gespanntes Seiltragwerk  
Fig. 17. Prestressed cable net



**Bild 18.** Seilknoten mit Anschluss der Membran  
Fig. 18. Cable joint with fixed membrane

mit den in den Ecken angeordneten Spannschlössern aufgebracht.

Die Sekundärmembranen schließen die Kehlen, die sich in den Achsen der Seilbinder befinden, und die 50 cm bis 60 cm breiten Schlitz- und Durchdringungspunkte der Luftstützen und Hängerseile.



Bild 19. Montage Membranfelder  
Fig. 19. Installation of the membrane canvas

### 6 Vermessungsarbeiten

Bereits im Juni 2009, rund zwei Jahre vor dem Beginn der Dach-Montagearbeiten, wurde die erste Bestandsvermessung im Hinblick auf die Dacherweiterung vom Tragwerksplaner veranlasst. Gemessen wurde in allen 40 Achsen an folgenden Stellen:

- Mitte Bohrung am Ringseilgussknoten
- Oberer Anschluss der vorhandenen Tragseile am Druckring
- Bolzenanschluss der Stützenköpfe am Druckring
- Bolzenanschluss der Stützenverankerungen

Die zweite Messung wurde Anfang Mai 2010, unmittelbar nach Auftragserteilung der Dacherweiterung an Eiffel Deutschland Stahltechnologie, mit den gleichen Messpunkten der ersten Messung durchgeführt.

Auf die Referenztemperatur der statischen Berechnung von 10°C [2] umgerechnet, stimmten beide Messungen sehr gut überein. Die Messergebnisse wurden in das 3D-Modell der Werkplanung eingearbeitet und in Verbindung mit den errechneten Verformungen aus der statischen Berechnung [3] für die Kontrolle der Bauzustände verwendet.

Die dritte Vermessung erfolgte unmittelbar vor Montage der Luftstützen. In diesem Zusammenhang wurde eine direkte Abstandsmessung zwischen den Ringseilgussknoten und den neuen Knotenblechen der Rückspannseile durchgeführt. Damit konnten die Längen der Rückspannseile aktuell an die Dachgeometrie mit den neuen Knotenblechen am oberen Druckring angepasst zu werden. Die Rückspannseile erhielten zu diesem Zweck Spanschlösser.

Weitere Vermessungen erfolgten nach Fertigstellung des Seiltragwerks und Montage der Dachmembranen. Durch die Ergebnisse ließ sich dokumentieren, dass die Dachgeometrie innerhalb der vorgegebenen Toleranzen (zulässige vertikale Abweichung ± 75mm, horizontal ± 45mm) erstellt wurde.

Tabelle 1. Übersicht der eingebauten Massen  
Table 1. Steel, cable and membrane quantities

Bauteil	Masse
Konstruktionsstahl der Verstärkungsmaßnahmen am oberen Druckring und an den Vertikalverbänden	170 t
Konstruktionsstahl der Luftstützen für die Erweiterung der Seilkonstruktion	60 t
Konstruktionsstahl der Bögen als Unterkonstruktion der Membranfelder	30 t
Konstruktionsstahl der Flutlichtbühnen	6 t
Radialseile und Ringseile VVS 30 bis VVS 45 sowie 2 Ringseile VVS 55 am inneren Rand des Daches	280 Stück
PVC-beschichtetes Polyestergewebe der Membranfelder	5750 m <sup>2</sup>

Tabelle 2. Terminlicher Ablauf  
Table 2. Chronological schedule

Vorgang	Zeitraum
Erstellung der Werk- und Montageplanung	Mai 2010 bis April 2011
Abriss der alten Tribünen der Untertürkheimer Kurve und Bau der neuen Tribünen incl. Sporthalle „Scharrena“	August 2009 bis Juli 2010
Abriss der alten Tribünen der Cannstädter Kurve und Bau der neuen Tribünen	August 2010 bis Juli 2011
Verstärkung des Druckrings Bereich Cannstädter Kurve	Oktober bis Dezember 2010
Verstärkung des Druckrings Bereich Untertürkheimer Kurve	Januar bis März 2011
Austausch der Seile der Vertikalverbände	März bis Mai 2011
Montage des inneren Seiltragwerkes der Dacherweiterung	April bis Juni 2011
Montage der neuen Flutlichtbühnen	Juni 2011
Montage der Membrane der Dacherweiterung	Juni bis Juli 2011
Übergabe der fertigen Dacherweiterung	Ende Juli 2011



## 7 Mengenübersicht und terminlicher Ablauf

Da die neue Dachverbreiterung an ein vorhandenes, filigranes Membran-/ Seiltragwerk anschließt, mussten alle Arbeiten mit besonderer Sorgfalt ausgeführt werden, um keine Beschädigungen an der Substanz herbeizuführen und die Vorgaben des Planers möglichst genau umzusetzen. Insgesamt wurden die in **Tabelle 1** aufgeführten Massen verbaut. In **Tabelle 2** ist der zeitliche Ablauf zusammengefasst.

### Literatur

- [1] Bergermann, R., Göppert, K.: Das Speichenrad – Ein Konstruktionsprinzip für weitgespannte Dachkonstruktionen, Stahlbau 69 (2000) 595 – 604
- [2] Schlaich Bergermann und Partner: Dachtragwerk (Bestand und Erweiterung) – Statische Berechnungen einschl. Ergänzungen, 2009 – 2011 (unveröffentlicht)
- [3] Ingenieurgemeinschaft Thor – Schipper – Schween: Statische Berechnung der Montagezustände, Teile 1 bis 4, 2010 – 2011 (unveröffentlicht)

### Beteiligte

Bauherr:	Stadion Neckarpark GmbH & Co. KG Mercedesstraße 50, 70732 Stuttgart
Architekt:	ASP Architekten Talstraße 41, 70188 Stuttgart
Tragwerksplanung:	Schlaich Bergermann und Partner Schwabstraße 41, 70197 Stuttgart
Ausführende Firma der Dacherweiterung:	Eiffel Deutschland Stahltechnologie Hackethalstraße 4, 30179 Hannover
Montageberechnungen:	Ingenieurgemeinschaft Thor – Schipper – Schween Neuer Markt 4, 49393 Lohne