

Ringträgerkonstruktionen in Theorie und Praxis

Katharina Kunz¹, Roman Kemmler²

¹ Ingenieurin bei *schlaich bergemann partner (sbp se)*

² Fakultät Bauingenieurwesen der HTWG Konstanz, Gesellschafter *isea tec GmbH*, Friedrichshafen

Zusammenfassung: Der nachfolgende Beitrag verbindet theoretische Grundlagen der Formfindung mit Beispielen aus der Praxis. Der Fokus liegt auf Ringträgerkonstruktionen, wie sie bei Stadionsdächern eingesetzt werden. Anhand von zwei gebauten Beispielen werden die Besonderheiten und Herausforderungen der Verbindungselemente erörtert.

1 Einführung

1.1 Motivation

Angesichts der weltweit wachsenden Herausforderungen und den damit verbundenen Erfordernissen nach neuen nachhaltigen Konzepten und Ansätzen, auch in der Bauindustrie, werden sich die Prinzipien des Leichtbaus durchsetzen. Sie führen nicht nur zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs – denn es wird weniger Material verwendet, leichtere Bauteile ermöglichen einen besseren Transport, die Montage wird vereinfacht – sondern am Ende des Lebenszyklus werden auch Demontage und Recycling erleichtert. Insofern leisten Leichtbaukonstruktionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg einen doppelten Beitrag zur Nachhaltigkeit.

Im Sinne dieser Mission hat sbp bereits viele Speichenrad-Dachkonstruktionen weltweit geplant und realisiert. Eine Abwandlung davon ist die Ringträgerstruktur. Dabei werden die Vorteile der normalen Ringseildächer genutzt mit dem Unterschied, dass die äußere Form und Hülle des Daches sowie des Bauwerks variieren und nahezu jeder architektonischen Form folgen können.

Die Geometrie der Dachkonstruktion und die Anordnung der Elemente sind dabei so gewählt, dass die äußeren Lasten nur durch Druck und Zug abgetragen werden. Die Vermeidung von Biegeeffekten ist der Schlüssel zum erfolgreichen Entwurf von Leichtbaukonstruktionen.

1.2 Vom Ringseildach zum Ringträgerdach

Seit einigen Jahrzehnten kommt das Konstruktionsprinzip Ringseildach häufig bei der Überdachung von Sportstätten zum Einsatz. Aufgrund der geschlossenen Struktur eines Stadions eignet sich das mit mehreren Ringen ausgebildete Tragwerk ideal, um leichte und transparente Dächer auszuführen. Frühe und bekannte Vertreter dieser Konstruktionsart sind die Dächer der heutigen MHP-Arena (ehemals Mercedes-Benz Arena) oder das Stadion in Kuala Lumpur (siehe Abb. 1).

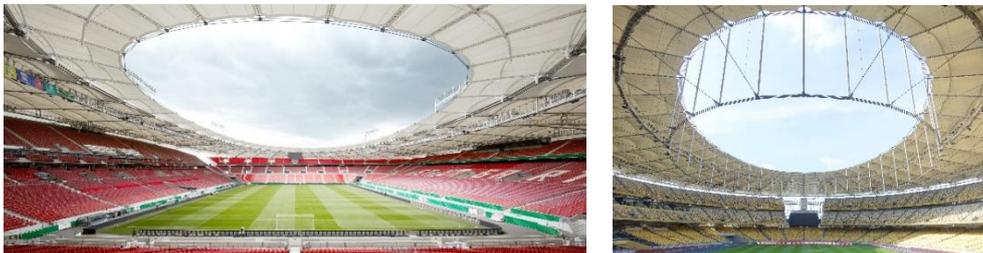


Abbildung 1: MHP-Arena und Stadion Kuala Lumpur
Foto links © swencarlin.com / rechts © schlaich bergemann partner

Mit den angeordneten Ringen wird die Übertragung des Momentes, welches aus den auf die Dachfläche wirkenden, vertikalen Kräften entsteht und mit den außenliegenden, vertikalen Stützenkräften im Gleichgewicht steht, in den Untergrund vermieden. Über Vorspannung werden die äußeren Ringe in einen Druck- und die inneren Ringe in einen Zugzustand versetzt. Durch die in den Achsen der Radialbinder vorhandenen Knicke der Ringelemente werden Umlenkkräfte hervorgerufen (siehe Abb. 2). Zur Erzielung von unter Zug stehenden, radialen Bindern muss die Anzahl der Ringe mindestens drei sein.

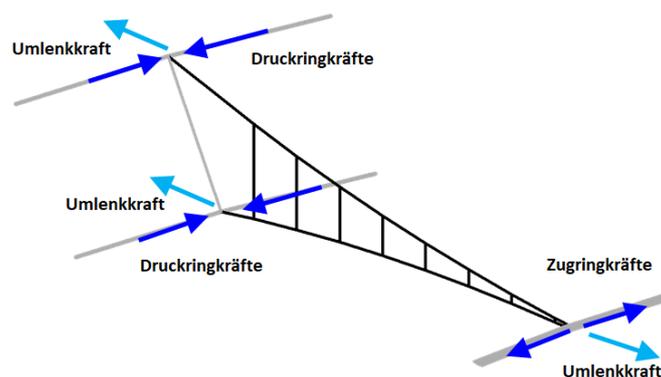


Abbildung 2: Ringelemente unter Vorspannkraften und deren Umlenkkräfte
© Kemmler

Die Ringe werden so angeordnet, dass die resultierende Kraft auf einen Radialbinder am inneren Rand unterhalb der resultierenden Kraft am Außenrand zum Liegen kommt. Das dadurch hervorgerufene Moment steht im Gleichgewicht zu dem Moment des vertikalen Kräftepaars, bestehend aus Einwirkung und Stützenkraft.

Mit zwei äußeren Druckringen und einem inneren Zugring (siehe Abb. 1) ist die ursprüngliche Dachkonstruktion der früheren Mercedes-Benz Arena (heute: MHP-Arena) ein klassischer Vertreter dieser Variante. Die resultierende Umlenkraft des inneren Zugringes auf den Radialbinder liegt dabei unterhalb der resultierenden Umlenkraft der außenliegenden Druckringe (siehe Abb. 3).

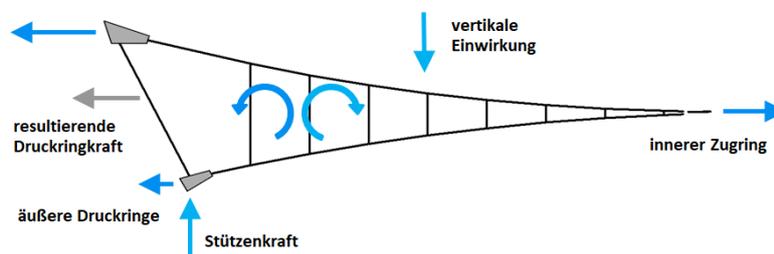


Abbildung 3: Ringseildach in der Variante mit zwei Druck- und einem Zugring
© Kemmler

Eine weitere Variante sieht die Anordnung eines äußeren Druckrings und zwei inneren Zugringen vor. Die resultierenden Kräfte weisen wie die oben erläuterte Charakteristik auf (siehe Abb. 4).

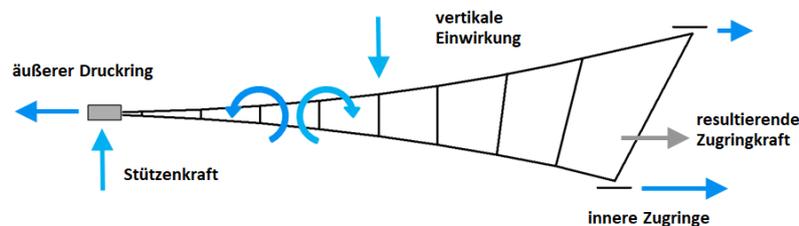


Abbildung 4: Ringseildach in der Variante mit einem Druck- und zwei Zugringen
© Kemmler

Infolge veränderlicher, vertikaler Einwirkungen verformt sich das Dachtragwerk und ruft eine Kraftänderung in den doppelt vorhandenen Ringelementen hervor. Durch Erhöhung bzw. Verringerung der Ringkräfte werden die daraus resultierenden Umlenkmomente vertikal verschoben und das dadurch hervorgerufene Moment an die Einwirkungen angepasst.

Das Konstruktionsprinzip des Ringseildaches bedingt, dass die Ringelemente in jeder Radialbinderebene einen Knick aufweisen. Folgt die Begrenzung der Dacheindeckung den

Ringelementen, so sind lediglich runde bzw. ovale Dachformen im Grundriss möglich. Davon abweichende Dachformen sind nur durch von der Dachhaut abgesetzte Ringelemente möglich (siehe Abb. 5).



Abbildung 5: Ringseildach des Volksparkstadions in Hamburg
© Euroluftbild

Ein weiteres restriktives Kriterium für die Dachgeometrie ist, dass bei Ringseildächern die Höhenlage des einzelnen Ringelementes zwischen den doppelt vorkommenden Ringelementen zum Liegen kommen muss.

Abb. 3 und 4 verdeutlichen, dass für das ebene Gleichgewicht eines Radialbinders vier Kraftgrößen (drei Umlenkkräfte und eine Stützkraft) bestehen. Somit steht für die drei Gleichgewichtsbedingungen eine zusätzliche Kraftgröße zur Verfügung, wodurch das System radial vorgespannt werden kann.

Die Einschränkungen der Geometrie kann man umgehen, indem auf das Vorspannen der Radialbinder und damit auf die Verwendung von reinen Zugelementen innerhalb des äußeren Druckrings verzichtet wird. Verwendet man lediglich zwei Ringelemente, eines davon unter Zug und das andere unter Druck, so entsteht durch die Umlenkkräfte ein Kräftepaar, welches ein gegendrehendes Moment aus Einwirkung und Stützkraft hervorruft (siehe Abb. 6). Damit bilden die Ringelemente ein Ringträgersystem mit positivem Biegemoment. Die Radialelemente können nun als Biegeträger oder als Fachwerkträger mit aufgelösten Gurten ausgebildet werden.

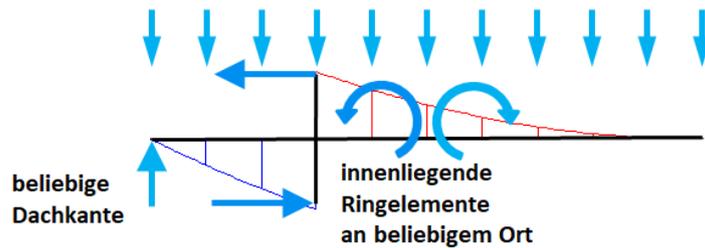


Abbildung 6: Funktionsprinzip Ringträgerdach
© Kemmler

Das Moment aus dem Kräftepaar der Ringelemente kann über die Kräfte und dem Hebelarm eingestellt werden. Das bedeutet, dass über die Größe der Knickwinkel bei den Ringelementen in den Radialachsen und der Höhendifferenz der Ringelemente zwei variablen Größen vorhanden sind, mit denen sich die Geometrie des Daches einstellen lässt (siehe Abb. 7).

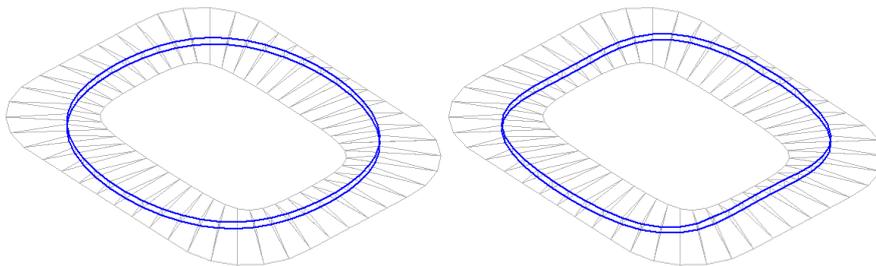


Abbildung 7: Interaktion zwischen Knickwinkel und Abstand Ringelemente
© Kemmler

Durch die variable Höhendifferenz weisen die Ringelemente neben radialen auch vertikalen Komponenten der Umlenkkräfte auf. Im Weiteren ist die Beanspruchung der Radialbänder aufgrund ihrer Anordnung im Dachtragwerk ungleichmäßig. Aus diesem Grund ist bei der Geometrieentwicklung das Gesamtsystem zu berücksichtigen.

2 Ansätze der Formfindung

Die Formfindung ist eine Disziplin, die ihren Ursprung bei biegeweichen, zugbeanspruchten Tragwerken hat. Für diese Bauweise ist eine Formfindung unablässig und wurde bereits in den 1970er Jahre intensiv diskutiert. Neben physikalischen Modellen wurden auch numerische Methoden entwickelt. Mit dem Ansatz der Kraftdichtemethode von Prof. Linkwitz [1] wurde die Geometrie vorgespannter Seilnetzkonstruktionen gefunden. Ein

weiterer, verbreiteter Ansatz ist die Dynamische Relaxation [2]. Dieser Ansatz löst das Problem einer statischen Gleichgewichtsgeometrie mittels einer stark gedämpften, dynamischen Analyse. Bei beiden Ansätzen werden geometrische Nebenbedingungen durch Veränderung der initialen Konfiguration des numerischen Modells eingearbeitet.

In [3] wurde ein weiterer Ansatz aufgezeigt. Wie bei der Kraftdichte-Methode wird bei der SGC-Methode (statically-geometrically coupled method) keine Materialisierung des Problems vorgenommen. Führt man nun die Kräfte der eindimensionalen Elemente ebenfalls als variable Größe ein, so können aus mathematischer Sicht neben den Gleichgewichtsbedingungen die Einhaltung weiterer Bedingungen gefordert werden. So entsteht ein gekoppeltes Problem aus Gleichgewicht und Geometrievorgaben. Da dem Verfahren, wie bei der Kraftdichte-Methode, keine Energieformulierung zugrunde liegt (keine Formulierung energetisch konjugierter Größen aus Kraft und Verschiebung) und überzählige Variablen vorhanden sind, gelingt eine Entkopplung der Geometrievorgabe und der Gleichgewichtserfüllung.

Durch diese Entkopplung können – trotz Vorgabe der Geometrie – Gleichgewicht und – trotz variabler Geometrie – Reaktionskräfte für die einzelnen Knoten und Richtungen formuliert werden. Gegenüber der Kraftdichte-Methode erhält man nun allerdings ein hochgradig nichtlineares Problem. Analog zur nichtlinearen Strukturanalyse kann das Formfindungsproblem mittels Newton-Raphson-Verfahren gelöst werden. Hierzu muss aus mathematischer Sicht ein reguläres Problem definiert werden. Dies stellt die wesentliche Anforderung einer konkreten Formfindungsaufgabe dar, da die formulierten Kraft- und Geometrienebenbedingungen sich nicht widersprechen und nicht mehrdeutig sein dürfen, um eine Jacobimatrix zu erhalten, welche einen vollen Rang aufweist. In der Regel gelingt dies nur anhand eines sukzessiven Aufbaus des Modells.

3 Das Ahmed bin Ali-Stadion

3.1 Allgemeines

Das Ahmed bin Ali-Stadion gehört zu Al-Rayyan City und liegt 20 km westlich von Doha. Das Stadion wurde 2003 erbaut und im Jahr 2014 für die Fußball-Weltmeisterschaft 2021 umgebaut. Im Interesse der Nachhaltigkeit wurde das vorhandene Material so weit wie möglich wiederverwendet.

Für die Konstruktion schlug sbp ein Ringträgerdach vor, das im Vergleich zum ursprünglichen Entwurf mit vier großen Fachwerkträgern signifikante Einsparungen in der Stahltonnage des Dachtragwerks ermöglichte.

3.2 Beschreibung der Dachkonstruktion

Die Hauptabmessungen im Grundriss betragen 225 m x 194 m mit einer ovalen Rundöffnung von 125 m x 85 m über dem Spielfeld und umfassen eine Fläche von 32.700 m².

Das Dach besteht aus 48 Radialbindern, die sich von den Stützen zu einem inneren Ringbinder mit einem oberen Druckring und einem unteren Zugring erstrecken. Tangentiale Pfetten spannen sich zwischen den Untergurten der Radialbinder und tragen gedämmte

Metallpaneele. Horizontale und vertikale Aussteifungselemente stabilisieren das System gegen ungleichmäßig verteilte Lasten und bilden eine steife Dachkonstruktion (Abb. 8).

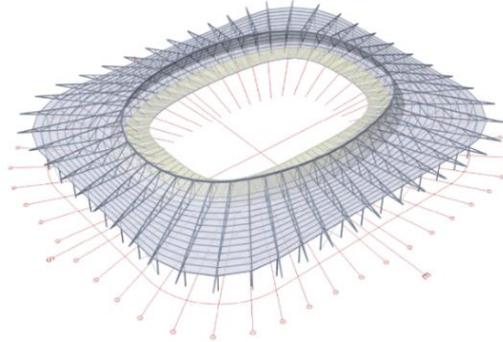


Abbildung 8: Isometrischer Schnitt des Daches
© schlaich bergemann partner

3.3 Das Ringträgersystem

Im Rahmen der Optimierung des Dachtragwerks und der Formfindung wurden zunächst zahlreiche Optionen untersucht und verglichen. Hier wurden beispielsweise Ondulationen des Druckrings, der zwei Zugringe und verschiedene statische Höhen zwischen Druck- und Zugring analysiert, hinsichtlich statischer und architektonischer Wirkung ausgewertet und ein Optimum an Effizienz weiterverfolgt.

Die Strukturhöhe zwischen Druckring und Zugring variiert zwischen 13 m und 15 m in Abhängigkeit der Spannweiten, bzw. Dachtiefen. Radialbinder leiten die vertikalen Lasten durch Druck in den Obergurten und Zug in den Untergurten in die Stützen ab (Abb. 9).

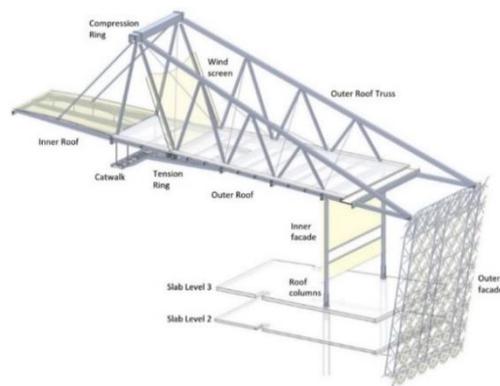


Abbildung 9: Isometrischer Schnitt durch ein Dachfeld
© schlaich bergemann partner

3.4 Installation des Dachtragwerks

Eine Herausforderung für die Konstruktion ist die Installation des Dachtragwerks, welche in allen Sequenzen detailliert berechnet wurde.

Das Dach wird in einzelnen Stahlmodulen, bestehend aus zwei Radialbindern, Druckring und Tangentialträgern sowie temporären Stabilisierungselementen am Boden, vormontiert und auf die Dachstützen sowie temporäre Turmstützen gehoben. Sobald zwei Module installiert sind, wird die Zwischenlücke mit Einzelelementen geschlossen.

Nach dem Schließen des Druckrings wird das Dach für den Einbau des Zugrings durch Pressen nach oben gedrückt, um die verkürzten Stabelemente und Einbautoleranzen geometrisch auszugleichen. Sobald der Spannring geschlossen ist, werden die Stützen wieder abgesenkt und die restlichen Elemente installiert.

4 Die VTB Arena

4.1 Allgemeines

Die VTB Arena befindet sich im Nordwesten Moskaus. Das Konzept sah ein Fußballstadion und eine Indoor-Arena unter einem Dach vor. sbp entwickelte einen Sondervorschlag für die bereits bestehende Planung des Daches, der sowohl in wirtschaftlicher als auch in gestalterischer Hinsicht überzeugte. Um die vom Architekten vorgegebene Dachhaut möglichst wirtschaftlich zu realisieren, wurde für den Stadion-Bereich ein Ringträgerdach realisiert.

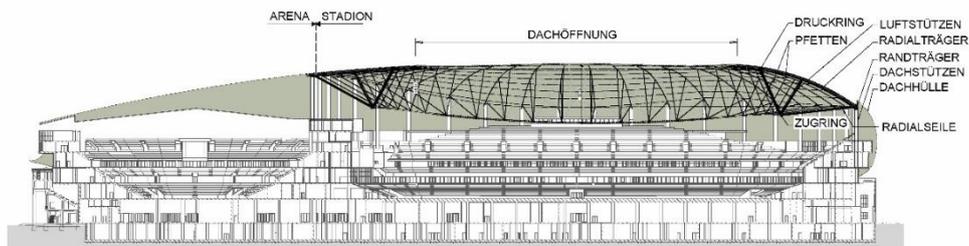


Abbildung 10: Längsschnitt
© schlaich bergemann partner

4.2 Randbedingungen des Entwurfs und Tragwerk

Das klassische Ringseildach musste aufgrund verschiedener Randbedingungen als Dachkonstruktion ausgeschlossen werden. Auch ein gewöhnliches Kragdach konnte die vorgegebenen Randbedingungen nur schwer erfüllen. Das geplante und ausgeführte Ringträgerdach erlaubt jedoch eine flexible Auflagerlinie ohne rückwärtige Abspannung, da die Kräfte im innenliegenden Zug- und Druckring kurzgeschlossen werden.

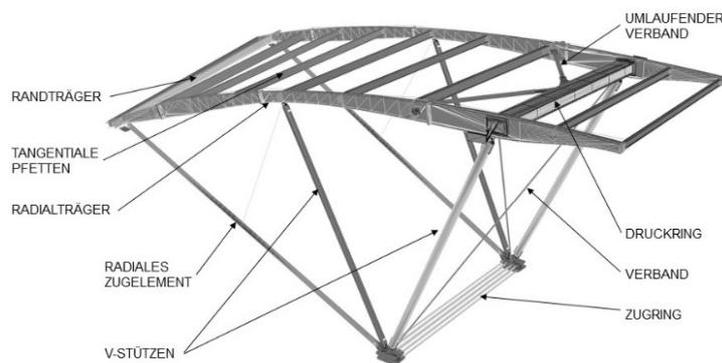


Abbildung 11: Hauptelemente Ringträgerdach
© schlaich bergemann partner

Geschweißte I-Profile mit gevoutetem Querschnitt spannen radial zwischen den äußeren, umlaufend angeordneten Betonstützen und dem fliegenden inneren Druckring.

Zwischen Zugring und Druckring sowie zwischen Zugring und Radialträgermitte sind V-förmige Rohrstützen angeordnet. Radiale Zugelemente aus Flachstählen zwischen dem Zugring und Auflagerpunkt schließen die Kräfte im System kurz. Tangentiale Pfetten stabilisieren die Radialträger und dienen als Auflager für die Unterkonstruktion der Dachhaut.

Während der Druckring konstant auf einer Höhe liegt, ergibt sich aus der Formfindung für den Zugring eine Ondulation. Die Höhe des Zugrings berücksichtigt dabei die Sichtlinienanforderung aller Zuschauerplätze.

4.3 Montage

Jeweils zwei am Boden vormontierte Druckringelemente mit Anschlussstücken für die Radialträger wurden zusammen auf Stützen und Hilfstürme gehoben. Darauf folgten die vormontierten Radialträgerpaaren mit Pfetten, die Zugringknoten und die Luftstützen. Mit dem Einbau der beiden radialen Zugelemente wurde die Montage eines Feldes abgeschlossen. Nach der Montage des übernächsten Feldes auf die gleiche Weise konnten die Zwischenpfetten installiert werden.

Durch die Montage im Baukastenprinzip konnte damit bereits begonnen werden als die ersten Elemente gefertigt waren. Montage und Fertigung liefen also parallel.

Für das Schließen der Ringe (Zugring und Druckring) wurden Pressen auf den Hilfstürmen eingesetzt. Durch lokales Anheben konnten die letzten Zugringelemente installiert werden. Nach der vollständigen Montage wurde das Dach in vier Schritten von den Futterblechen auf den Türmen abgesenkt, sodass es sich selbst trägt.

5 Fazit

Das hier vorgestellte Ringträgerdach bietet durch seine Flexibilität der Auflagerlinie für bestimmte architektonische Randbedingungen eine gute Alternative zu den bei Stadiondächern oft eingesetzten Kragdächer oder Ringseildächer.

Der Bedarf an Hilfsstützen während der Installation wird durch die parallele Fertigung und Montage ausgeglichen. Während das Ringseildach in sich selbst vorgespannt ist, findet die Vorspannung beim Ringträgerdach nur durch Eigengewicht statt. Das macht es zu einer robusten Tragstruktur, die auf Toleranzen bei Fertigung und Montage flexibel reagiert.

Im Vergleich zu herkömmlichen Speichenradsystemen verhält sich die Struktur zwar steifer, allerdings dauert die Installation durch das mehrfache Anheben von schweren Stahlmodulen und den vielen erforderlichen temporären Stützen auch länger.

Mit einem leicht erhöhten Flächengewicht der Stahlkonstruktion im Vergleich zu einem klassischen Ringseildach konnte sowohl für das Ahmed bin Ali-Stadion wie auch die VTB Arena ein wirtschaftliches und zugleich ansprechendes Dachtragwerk realisiert werden.

Literatur

- [1] LINKWITZ, K., SCHEK, H.-J. Einige Bemerkungen zur Berechnung von vorgespannten Seilnetzkonstruktionen. Ingenieur Archiv (1971), S. 145–158
- [2] BARNES, M.R. Form-finding and analysis of prestressed nets and membranes. Computers & Structures 30 (1988), Nr. 3
- [3] KEMMLER, R. Formfindung: Die Interaktion von Kraft und Geometrie. Stahlbau 81 (2012), Heft 6
- [4] GÖPPERT, K. Unter großen Dächern. Interdisziplinäres Entwerfen von Stadien. Bautechnik 89 (2012), Heft 10, S.694-700
- [5] GÖPPERT, K. Wheel of fortune. Innovative sports arena designs. Stadia show case special (2002)