



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE
UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastra

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68

Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf www.qucosa.de.

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i>	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzki, Franziska Pannasch</i>	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreusch, Florian Bavendiek</i>	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i>	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i>	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Kruedener, Pascale Dominik</i>	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i>	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i>	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i>	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i>	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i>	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i>	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i>	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i>	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i>	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	207
Übersicht KID-Hefte	215

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring

Robert Herold¹, Elke Reuschel², Peter Bauer³

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren hat eine Reihe von Einstürzen weitgespannter Dächer im Zusammenhang mit Schneefällen dazu geführt, dass der Zustand der baulichen Anlagen regelmäßig vom Baulastträger zu überprüfen ist. Im nachfolgenden Beitrag wird gezeigt, dass auch bei ungewöhnlichen Konstruktionen und Problemen Lösungen gefunden werden können, die den Weiterbetrieb der Sportstätten sicherstellen, denn trotz des Klimawandels ist auch in den kommenden Jahren noch mit teilweise beträchtlichen Schneefällen in Deutschland zu rechnen.

Summary: *Sports facilities with wide open hall roofs – Ensuring the load-bearing capacity under snow load through structural diagnostics, calculation, load analysis and monitoring.* In recent years, some collapses of long-span roofs caused by snowfall has led to periodical examinations of the condition of that structures. The article illustrates that solutions can even be found for exceptional constructions and problems to ensure the further operation of these sports facilities. Despite of climate change, snowfall is still being expected for the years to come.

1 Entwicklung des Zickzack-Faltwerks aus zusammengespannten Fertigteilen in der DDR

Ende der 1950er Jahre wurden in der DDR die grundlegende Standardisierung von Betonfertigteilen und die Vereinheitlichung von Montagetechnologien forciert. Nur auf diesem Weg war es möglich, den enormen Bedarf des Wohn-, Gesellschafts- und Industriebaus bei begrenztem Rohstoff- und Arbeitskräfteeinsatz abzudecken. In diesem Zusammenhang wurde auch eine Reihe von Untersuchungen zur Eignung von Raumtragwerken als Bedachungselemente durchgeführt, die der Forderung nach leichterem, kostengünstigerem und schnellerem Bauen genügen konnten. Noch vor der Zulassung und massenhaften Anwendung von VT-Falten, Trogfalten und HP-Schalen als filigrane Fertigteile für Dachtragwerke wurden Wellen- und Zickzackschalen in Pilotobjekten getestet. In [1] wurden umfangreiche Untersuchungen zu filigranen Fertigteilen auf dem Gebiet der DDR zusammengestellt, bei denen jeweils der spannungsrisikokorrosionsgefährdete Spannstahl St 140/160 aus Hennigsdorfer Produktion zum Einsatz kam. Allen diesen Elementen ist gemein, dass sie hocheffizient gefertigt und montiert werden konnten und nach dem Prinzip des sparsamsten Materialeinsatzes in experimentellen Untersuchungen optimiert wurden.

1 Dipl.-Ing. (FH), MFPA Leipzig

2 Prof. Dr.-Ing., Institut für Betonbau, HTWK Leipzig / MFPA Leipzig

3 Prof. Dr.-Ing. habil., MFPA Leipzig



Bild 1: Ansicht der Sporthalle der HTWK Leipzig mit Zickzack-Faltwerkdach
Foto: Christoph Schulze [4]

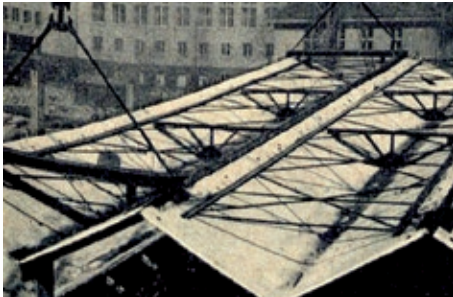


Bild 2: Kräftige Montageverbände für die filigranen Faltwerk-Elemente
Foto: aus [3]



Bild 3: Montagefolge der Zickzack-Falten
Foto: aus [3]

Die sogenannten Zickzack-Falten kamen über den Zustand der Pilotprojekte nicht hinaus. Die prinzipielle Eignung derartiger Raumtragwerke mit einer Dicke von nur 55 mm wurde beim Neubau des Instituts für Fördertechnik der Technischen Hochschule in Dresden (Heidebroek-Bau, [2]) nachgewiesen. Der erste Einsatz der aus zusammengespannnten Fertigteilen hergestellten Falten erfolgte bei einer Tunnelofenhalle in Rietschen 1962/63, nachfolgend wurden 1964/65 mehrere Gebäude im Glasseidenwerk Oschatz mit diesen Elementen ausgeführt, bevor 1966/67 das Dach der Sporthalle der Ingenieurhochschulen in Leipzig als erster Gesellschaftsbau mit diesen Fertigteilen errichtet wurde [3]. Wenngleich der Einsatz dieser filigranen Fertigteile begrenzt blieb, soll nachfolgend die in Bild 1 dargestellte Dachkonstruktion kurz vorgestellt werden, weitere Informationen sind beispielsweise in [3] enthalten.

Die Zickzack-Falten wurden am Boden in einer speziellen Halterung aus jeweils 5 rechteckigen Fertigteilen pro Seite zusammengesetzt. Anschließend wurden Faltenal und Querfugen ausgemörtelt und die einzelnen Elemente mit jeweils 6 Bündelspanngliedern SG 25 je Faltenseite zusammengespannt. Die Faltenstärke wurde in den einzelnen Pilotprojekten sukzessive gegenüber der Erstanwendung erhöht, um die Spannglied-Hüllrohre $\varnothing 32$ mm nicht mehr zusammendrücken zu müssen. Bei der Sporthalle sind die Bestandsunterlagen nicht eindeutig, Dicken zwischen 70 und 80 mm sind möglich. Die Spannglieder mit idealisiert parabelförmigem Verlauf wurden mittig im Falten Spiegel zwischen einer oberen und unteren schlaffen Bewehrungslage angeordnet, an den Verankerungsstellen erfolgte der Vergrößerung der Elementstärke auf 140 mm [3].

Die Montage der fertiggestellten Zickzack-Falten erfolgte mit Hilfe von zwei

Derricks, wobei zur Vermeidung der Beul- und Kippgefahr kräftige Verbände die freien Faltenränder stabilisieren mussten. Die rechnerische Lösung des Stabilitätsproblems war seinerzeit noch nicht möglich. In Modellversuchen wurde bei unversteiften Faltenrändern nur eine unbefriedigende Beulsicherheit erreicht und somit mussten die Montage traversen ein Stabilitätsversagen ausschließen [3]. Bild 2 veranschaulicht eindrucksvoll die filigranen Raumtragwerke und die erforderlichen Montageverbände, die jeweils bis zum Komplettieren der übernächsten Falte belassen wurden. In Bild 3 ist der Montageablauf der vor Ort am Boden gefertigten Dachelemente erkennbar. Das Eigengewicht der Zickzack-Falten betrug bei den letzten Pilotobjekten 2,25 kN pro Quadratmeter Hallengrundfläche. Die Fertigteile wurden für die Aufnahme von Wind und Schnee sowie von Ausbaulasten aus Abdichtung, Dämmung und einer leichten Unterhangdecke ausgelegt.

2 Ausgangssituation an der Sporthalle der HTWK Leipzig

Die 1967 fertiggestellte Sporthalle im Leipziger Süden befindet sich unweit des Campus der HTWK Leipzig. Sie wird für den Studenten- und Mitarbeitersport sowie Veranstaltungen der Hochschule, aber auch von Vereinen und Behörden genutzt. Die Halle hat ein Achsmaß von 50 × 30 m, eingeschossige Anbauten beherbergen Umkleide- und Sanitärräume sowie Mitarbeiterbüros, Lager und die Haustechnik. Das Raumfaltwerk spannt in etwa von Nord nach Süd (siehe Bild 4).

Nach ca. 40jähriger Nutzung wurde der erhebliche Modernisierungstau in Angriff genommen. Die Sanierungsarbeiten fanden 2009/2010 statt, u. a. wurde eine neue Unterhangdecke zur Verbesserung der Wärmedämmung und der Raumakustik installiert. Da das Hallendach



Bild 4: Lage der Sporthalle Arno-Nitzsche-Straße im Leipziger Stadtteil Connewitz

Grafik (modifiziert): www.openstreetmap.org

als Kaltdach konzipiert war und ist, konnten somit nach Demontage der alten Unterhangdecke erstmals seit Errichtung die Unterseiten der Zickzack-Falten begutachtet werden. Die Fertigteilelemente waren in einem optisch einwandfreien Zustand, nur an wenigen Stellen waren Mängel infolge ungenügender Nacharbeiten an Durchführungsstellen der Montagehilfsmittel und früherer Probenentnahmestellen erkennbar. Die Karbonatisierungstiefe betrug nur 7 bis 10 mm [5], jedoch konnte kein zusätzlicher Anstrich an der Faltenunterseite festgestellt werden, der bauaufsichtlich aufgrund der relativ geringen Betondeckung bei Errichtung gefordert gewesen war [5].

Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten und Wiedereröffnung der Halle kam es zum Jahreswechsel 2010/2011 zu gravierenden Schäden. Innerhalb kürzester Zeit liefen hunderte Liter Wasser aus der Dachkonstruktion in den Hallenraum, das Gewicht der Mineralwolle-Dämmschicht war aufgrund der starken Durchfeuchtung bedenklich vergrößert. Die Halle musste gesperrt und zunächst entfeuchtet werden. Trotz Veranlassung von bauphysikalischen Untersuchungen und Messungen von Seiten des Baulastträgers konnte keine endgültige Ursachenklärung erreicht werden. Durch eine völlige Neueinstellung der Lüftungsanlage wurde die Hallenluftfeuchte mit erheblichem Energieaufwand reduziert, um den Ausfall von Tauwasser zu verhindern. Weitere Planungen zu Umbaumaßnahmen, die eine Verbesserung des Wärme- und Feuchteschutzes sowie der Raumakustik der Sporthalle zum Ziel hatten, scheiterten an der rechnerisch begrenzten Tragfähigkeit der Spannbeton-Faltwerkkonstruktion. Somit waren bereits Überlegungen zu einer Dach-über-dem-Dach-Konstruktion im Gange.

In dieser unbefriedigenden Situation wurde die MFPA Leipzig seit Frühjahr 2015 schrittweise mit der Untersuchung des Ist-Zustands hinsichtlich der Bauphysik und der Tragfähigkeit des Hallendachs sowie zur Erarbeitung von Lösungsmöglichkeiten beauftragt. Erschwert wurde die bauphysikalische Situation 2015 durch die temporäre Unterbringung von Flüchtlingen.

3 Baudiagnostische und bauphysikalische Voruntersuchungen

Aufgrund des bereits 2007 dokumentierten, optisch guten Erhaltungszustands der Zickzack-Falten wurden Karbonatisierungstiefe und Lage der Bewehrung in der Nähe der vorhandenen Revisionsöffnungen nur stichpunktartig überprüft. Aufgrund der im Zuge der Sanierung aufgetragenen Hydrophobierung der Stahlbetonoberfläche war die Karbonatisierung nicht wesentlich vorangeschritten, auf der Innenseite der Fertigteile wurden 8 bis 11 mm, auf der Oberseite 2 bis 4 mm gemessen. Die planmäßige Betondeckung der schlaffen Bewehrung von 17 mm auf der Innenseite wurde jedoch teilweise um bis zu 5 mm unterschritten, an einer Stelle lag die Karbonatisierungsfrente somit knapp vor der unteren Querbewehrung. Die Spanngliedhüllrohre befanden sich in Solllage im gesichert alkalischen Milieu des Betons. Auf eine Öffnung von Hüllrohren und Entnahme von Spannstahl- und Mörtelproben wurde in Abstimmung mit dem Baulastträger vorerst verzichtet.

Im Ergebnis der baudiagnostischen Untersuchung der Problemstellen sowie der Auswertung von Messungen konnte in [6] festgestellt werden, dass das Faltdach aus bauphysikalischer Sicht – insbesondere hinsichtlich der Tauwasserproblematik – prinzipiell nicht verändert werden muss. Ebenso ergaben sich nach der Instandsetzung keine zusätzlichen Anforderungen aus der geltenden Energieeinsparverordnung. Zur Verbesserung der Durchlüftung des Kaltdachs wurden jedoch Vergrößerungen der Einströmöffnungen und Abtreppungen des

Dämmstoffs nahe der Einströmöffnungen vorgenommen, in Bild 5 ist beispielhaft der Zustand vor Veränderung dargestellt. Ebenso wurde eine weitestgehende Luftdichtheit in der Ebene der Unterdecke einschließlich der Revisionsöffnungen – also in der Trennebene zwischen warmer Halle und kalter Kaltdachbelüftungsschicht – hergestellt. An den Stützenbereichen war die Luftdichtheit in den Fensterlaibungen herzustellen. Wesentlich war in diesem Zusammenhang auch das Verschließen der mehrere Zentimeter breiten Fugen zwischen der Unterdecke und den Giebelwänden auf beiden Seiten. Es wurden Hinweise zum kurzfristigen Betrieb der Lüftungsanlage im Winter sowie Vorschläge für mittelfristige Veränderungen der Haustechnik unterbreitet. Details der Untersuchungsergebnisse und Empfehlungen können [6] entnommen werden. Aufgrund dieser Maßnahmen gab es bisher keinen erneuten schwerwiegenden Tauwasserausfall, jedoch sollten nach Großereignissen mit Menschenansammlungen bei ungünstigen Wetterverhältnissen Kontrollen und ggf. ergänzende Messungen vorgenommen werden.



Bild 5: Von Mineralwolle teilweise verdeckte Einströmöffnungen für die Hinterlüftung des Kaltdachs Foto: Peter Bauer

4 Rechnerische Voruntersuchungen

Durch eine Vorberechnung sollten der Lastabtrag und die Auslastung des Daches infolge der Eigenlasten sowie der Schnee- und Windlasten nach DIN EN 1991-1 [7], [8] untersucht werden. Die tragende Dachkonstruktion wurde unter Verwendung des Programms InfoCAD der Fa. Infograph, Aachen, modelliert und berechnet (siehe Bild 6). Durch ingenieurmäßige Abschätzung des eingetretenen Abbaus der Vorspannkräfte infolge der Reibung beim Vorspannen der Fertigteile, des Kriechens und Schwindens des Betons sowie der Relaxation des Spannstahls sollten mögliche Grenzen der Beanspruchbarkeit und Gefährdungen bewertet werden. Darüber hinaus war der Lastabtrag in Querrichtung für eine mögliche Belastungsuntersuchung zu analysieren.

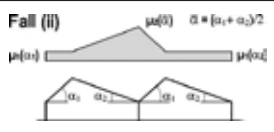


Bild 6: Ausschnitt aus dem FE-Modell der Dachkonstruktion mit Fertigteilen, Randverstärkungen und Fugen in den Faltentälern und -dächern sowie mit den verlegten Spanngliedern Grafik: Elke Reuschel

Die Eigenlasten der Konstruktion wurden programmintern unter Ansatz der Elementdicken und der baustoffzugehörigen Wichte für Stahlbeton mit 25 kN/m³ verrechnet. Bereits hier zeigte sich eine Abweichung zur Erstellungsstatik, in der für die Fertigteile mit 24,5 kN/m³ eine geringere Wichte und eine verschmierte Gesamtmasse bei 7,5 cm Regeldicke angesetzt worden waren. Für die tatsächlich vorhandenen Ausbaulasten wurden entsprechend der vorhandenen Unterlagen [5] als Flächenlast $g_{k2} = 0,25$ kN/m² und in den Faltentälern und -firsten als Linienlast $g_{k2} = 1,1015$ kN/m eingegeben. Diese waren nicht größer als in der Erstellungsstatik verwendet.

Die Schneelasten wurden bei Errichtung mit 75 kg/m² angesetzt [5], das entspricht 4,5 kN/m pro Faltental. Eine explizite Berücksichtigung möglicher Schneesackbildung erfolgte seinerzeit nicht. Die Schneelast auf dem Boden ist nach nationalem Anhang zu [7] für die Schneelastzone 2 in Leipzig mit 0,85 kN/m² anzusetzen. Die Formbeiwerte μ wurden nach Tabelle 1 aus [7] entsprechend der vorhandenen Dachform gebildet.

Tabelle 1: Formbeiwerte für Schnee auf Dächern in Abhängigkeit der Dachneigung, aus [7]

Neigung α des Pultdachs	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha > 60^\circ$	Fall (II) 
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0	
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	–	

Bei der vorliegenden Dachneigung von ca. 35° ergibt sich der Formbeiwert μ_1 für die nicht verwehten Dachbereiche zu 0,67. In den Faltentälern ist aufgrund von möglichen Schneeverwehungen mit $\mu_2 = 1,6$ ein größerer Wert anzusetzen. Die charakteristische Schneegrundlast s_k auf dem Dach ergibt sich zu 0,57 kN/m² und damit zusammengefasst zu 3,42 kN/m pro Faltental. Infolge Verwehung im Faltental beträgt die Schneelast dann 1,36 kN/m² und unter Berücksichtigung der Fugenausbildung ergibt sich die resultierende Schneelast zu 6,50 kN/m.

Bei der Berechnung der Windlasten für die Dachkonstruktion der Sporthalle nach [8] wurde der Böengeschwindigkeitsdruck für die Stadt Leipzig in Windlastzone 2 zu $q = 0,80$ kN/m² angesetzt. Die Anströmrichtung des Windes auf den Giebel wurde gegenüber der Hallenlängsseite maßgebend. Insgesamt ist der anzusetzende Vertikallastanteil des Windes pro Faltental mit 0,29 kN/m jedoch sehr gering.

In der Überlagerung der beiden veränderlichen Einwirkungen mit Schnee als Leiteinwirkung ergibt sich mit

$$q_k = 6,5 + 0,60 \cdot 0,29 = 6,67 \text{ kN/m}$$

eine deutliche Vergrößerung gegenüber dem Ansatz in der Erstellungsstatik.

Da ein rechnerischer Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit auch aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten für den Ansatz der ständigen Einwirkungen aus Eigengewicht und der Restvorspannung nicht möglich war, wurde auf einen experimentellen Nach-

weis orientiert, der in Verbindung mit einem Monitoring in den Winterhalbjahren die weitere Nutzung der Sporthalle garantieren sollte.

5 Durchführung von Belastungsversuchen

Ziel der Untersuchungen, die im Sommer 2016 in Anlehnung an die Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ [9] durchgeführt wurden, war der Nachweis der Dachkonstruktion gegenüber den normativ geforderten Schnee- und Windlasten. Für die Durchführung der Belastungsversuche wird in [9] auf selbstsichernde Kraftkreisläufe orientiert. Hierfür müssen die Versuchslasten entweder gegen die tragende Konstruktion oder gegen eine Starrlast rückverankert werden. Aufgrund der vorliegenden Randbedingungen der Sporthalle war dies nicht vollständig möglich. Zum einen war die Stützweite mit 30 m für eine Überspannung mit der Lastableitungskonstruktion zu groß, zum anderen war das Antransportieren von großen Starrlasten und Absetzen auf dem vorhandenen Sportparkett nicht möglich. Daher wurde ein neuartiges Belastungskonzept entwickelt, das selbstsichernde und nicht selbstsichernde Elemente enthält.

In einem ersten Schritt erfolgte eine Belastung mit Wasser in Behältern, die zuvor hinsichtlich ihres Füllstands in der Versuchshalle der MFPA Leipzig kalibriert wurden. Die Behälter wurden auf einer hölzernen Lastverteilungskonstruktion in den Faltwerkträgern auf dem Dach positioniert. In mehreren Stufen wurde der Wasserballast bis auf ca. 75 % der Gebrauchslast gesteigert, bei der sich die Dachkonstruktion auf der Grundlage der statischen Nachrechnung gesichert im Zustand I befinden sollte. Jede weitere Laststeigerung sollte dann zunächst hydraulisch erzeugt werden, bei Erreichen von Grenzkriterien war somit eine schnelle Entlastung des hydraulisch eingetragenen Belastungsanteils möglich. Die Rückverankerung der hydraulischen Last erfolgte gegen eine Stahltraverse, die von einem Autokran über die Dachkonstruktion gefahren wurde (siehe Bild 10). Nach jeder erfolgreichen Laststufe wurde die hydraulische Belastung wieder abgelassen und durch Wasserballast ersetzt. Eine zwischenzeitliche Entlastung des Wasserballasts während des Versuchs war aus Zeitgründen nicht vorgesehen. Für die Wasserentnahme wurde ein in der Nähe befindlicher Hydrant der städtischen Wasserwerke genutzt.

In der FE-Berechnung (Bilder 7 und 8) stellten sich die beiden mittleren Falten für das gesamte Raumtragwerk erwartungsgemäß als maßgebend heraus, daher wurden diese beiden Falten dem Belastungsversuch unterzogen. Aufgrund des räumlichen Lastabtrags des Systems hätte jedoch eine alleinige Belastung dieser beiden Falten nicht ausgereicht (siehe Bild 8). Für die Erzeugung der bemessungsrelevanten Beanspruchung hätten die Versuchslasten um fast 50 % vergrößert werden müssen. Zur Vermeidung lokaler Überbeanspruchungen durch die Versuchslasten wurden somit auf beiden Seiten der Hauptfalten noch jeweils zwei weitere Zusatzfalten mit einer Wasser-Grundlast beansprucht. Auf diese Weise konnte der Erhöhungsfaktor für die

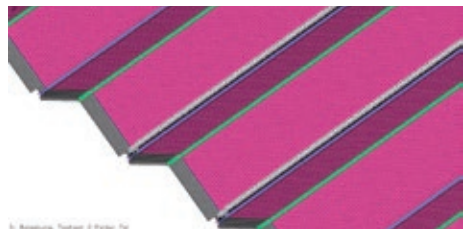


Bild 7: Darstellung der Lasteingabe (grau im Bild) in den Tälern der beiden Hauptfalten
Grafik: Elke Reuschel

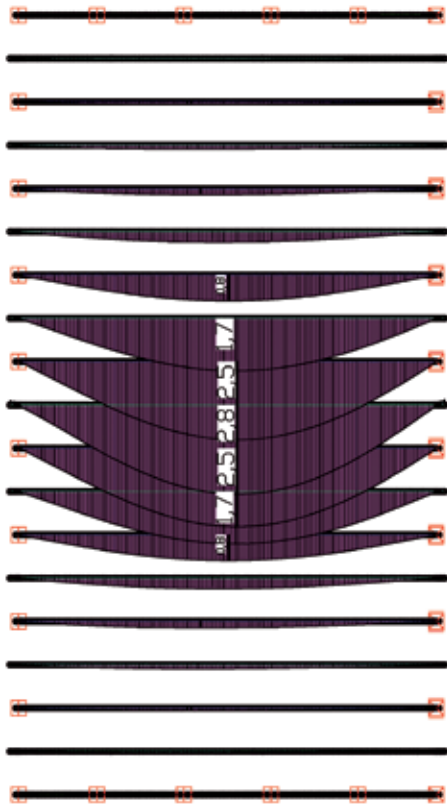


Bild 8: Ergebnis der Verformungsberechnung
Grafik: Elke Reuschel



Bild 9: Belastungsanordnung auf dem Sporthallendach aus der Vogelperspektive
Foto: David Rieger

Hauptfalten erheblich reduziert werden. In Bild 9 ist die Belastungsanordnung auf dem untersuchten Dach fotografisch dargestellt. Deutlich erkennbar sind die beiden getesteten Hauptfalten mit enger Anordnung der Wasserbehälter und der Stahltraverse für die hydraulische Lasteinleitung sowie die insgesamt vier angrenzenden Zusatzfalten mit größerem Abstand der Wasserbehälter. Bild 10 zeigt das Detail der hydraulischen Lasteinleitung.

Während des Belastungsversuchs wurden neben den eingetragenen Kräften die Durchbiegungen und Dehnungen der belasteten Faltenwerkstruktur an charakteristischen Stellen mit einem digitalen Messverstärkersystem gemessen. In Bild 11 ist die prinzipielle Anordnung der Sensoren erkennbar, die Bilder 12 und 13 zeigen Details der eingesetzten Messtechnik. Zusätzlich wurde von Seiten des Lehrbereichs Vermessungskunde der HTWK Leipzig ein Festpunktfeld im Inneren der Sporthalle für ein an der Giebelwand befestigtes Präzisionsnervotachymeter installiert, um an 6 Messpunkten die Dachbewegungen dreidimensional erfassen zu können. Damit wurden u. a. auch wichtige Aussagen zur Bewegung der Stützenköpfe und als Redundanzmessung zur Falten durchbiegung erzielt. Die tachymetrische Messung erfolgte automatisiert und kontinuierlich, eine gemeinsame Auswertung der Daten der beiden Messsysteme erfolgte über eine Synchronisation der Versuchszeit. Da die Messungen während der Belastungsuntersuchungen über mehrere Stunden andauerten, wurden die Einflüsse aus Temperaturveränderungen an mehreren Stellen zusätzlich mit erfasst.

Im durchgeführten Belastungsversuch konnte erwartungsgemäß nicht die volle Belastung abgetragen werden, die nach aktuellen Normen unter Berücksichtigung der Dachform und der anzusetzenden



Bild 10: Justierung der Stahltraverse zur hydraulischen Lastableitung auf dem Hallendach

Foto: Robert Herold

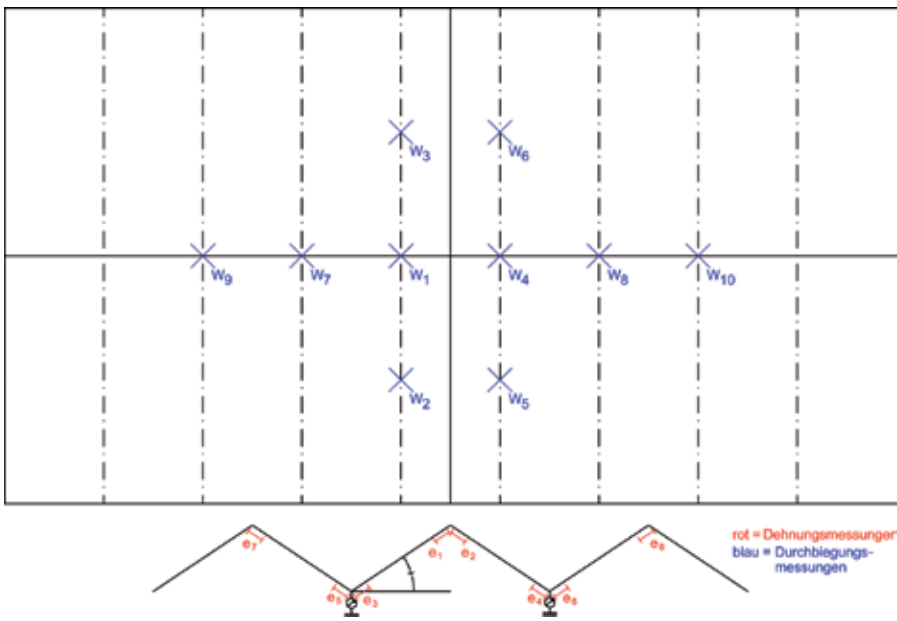


Bild 11: Schematische Anordnung der Messstellen (ohne Tachymetrie und Temperatur)

Grafik: Robert Herold



Bild 12: Messung der Faltendurchbiegungen mit Seilwegaufnehmern
Foto: Robert Herold



Bild 13: Messung der Betondehnungen in den Faltentälern mit induktiven Wegaufnehmern
Foto: René Fritzsche

Sicherheiten gefordert wird, da der Lastenteil durch die Schneesackbildung sehr groß ist. Allerdings wurde im Versuch ein Lastniveau nachgewiesen, das deutlich über den angesetzten Belastungen aus der Errichtungszeit einschließlich der erforderlichen Sicherheiten liegt. Die Versuchslast wurde bei Erreichen der Dekompression der vorgespannten Fertigteile in Feldmitte nicht weiter gesteigert – es sollte keine Schädigung verursacht werden, die die weitere Nutzung beeinträchtigen würde. Da die Belastungsuntersuchungen völlig neue Erkenntnisse zum räumlichen Lastabtrag und zum Zwang aus Temperatureinflüssen ergaben, die in dieser Form zur Errichtungszeit nicht berücksichtigt wurden, wurden diese Einflüsse im Zuge einer detaillierten Versuchsauswertung separiert. Bild 14 zeigt ein beispielhaftes Messwertdiagramm für die im Faltental während der Laststeigerung gemessenen Betondehnungen. Das vorliegende rechnerische Modell des Sporthallendachs wird derzeit hinsichtlich der erzielten Messergebnisse angepasst und für eine hybride statische Nachweisführung der Konstruktion genutzt. In dieser können dann auch künftig geplante Veränderungen der Einwirkungen aus Ausbaulasten, bspw. aus einer neuen Dachabdichtung, berücksichtigt werden.

6 Durchführung eines Schneelastmonitorings

Nach Abschluss der Belastungsversuche wurden insgesamt 4 Dehnungs- und Temperatursensoren in den Faltentälern im mittleren Hallenbereich für das Schneelastmonitoring ausgewählt und an einen Datenlogger angeschlossen. Dieser wurde über ein Mobilfunkmodem an eine Internetplattform zur Messwertüberwachung gekoppelt. Bei Überschreitung von festgelegten Alarmwerten wird eine Alarmierung über eine Signalleuchte in der Halle sowie den Versand von Nachrichten an

einen festgelegten Personenkreis ausgelöst. Die Alarmierung ist nach dem Ampelprinzip konzipiert: Alarmstufe Gelb – Vorankündigung einer evtl. notwendigen Schneeräumung, Alarmstufe Rot – vorsorgliche Schließung der Halle und Beginn der Schneeräumung. Das auf diese Weise installierte und kalibrierte System wird seit Sommer 2016 betrieben, die nur in der ersten Januarhälfte 2017 auftretenden Schneefälle mit weniger als 5 cm Schneehöhe auf dem Boden konnten gut identifiziert werden. Aus Bild 15 ist jedoch erkennbar, dass die jahres- und insbesondere im Sommer tageszeitlich bedingten Temperaturänderungen zu erheblich stärkeren Dehnungen in den Faltentälern führen als angenommen. Die bei Errichtung geplante statisch bestimmte Lagerung der Fertigteilfalten kann also nicht mehr wirksam sein. Wie bereits während der wenigen Tage der Belastungsversuche festgestellt, werden die thermisch bedingten Längenänderungen der Dachelemente durch die Horizontalverformung der Stützenköpfe auf beiden Seiten der Halle sowie das „Atmen“ der Zickzack-Falten aufgenommen. Im Ergebnis dessen sollen vor Beginn der nächsten Winterperiode auch im Hinblick auf die schwierige zu realisierende Schneeräumung notwendige Anpassungen in der Instrumentierung und Alarmierung des Monitoringsystems vorgenommen werden. Ebenso sind weitere Maßnahmen zur Sicherstellung der Hallennutzung in der kalten Jahreszeit in Planung.

Auf der Grundlage der durchgeführten Messungen ist ein Weiterbetrieb der Sporthalle möglich, auf regelmäßige Zustandskontrollen nach [10] sollte jedoch auch künftig nicht verzichtet werden.

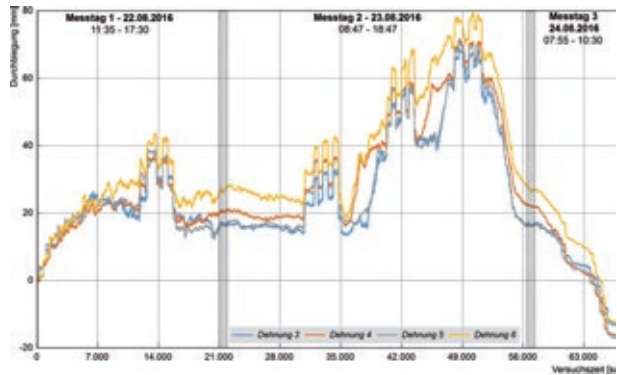


Bild 14: Messwertdiagramm der Dehnungen 3 bis 6 in den Hauptversuchsfalten Grafik: Robert Herold

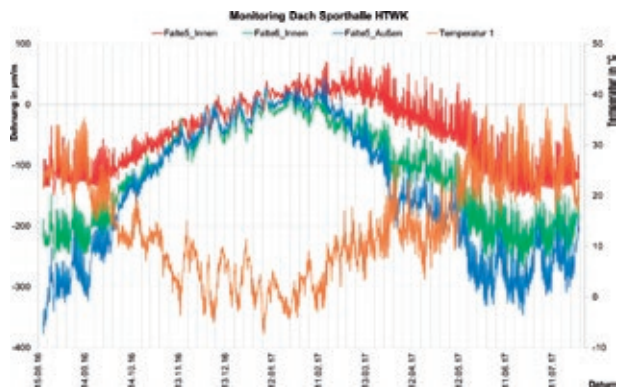


Bild 15: Aufzeichnung der Dehnungen in den Faltentälern über den Messzeitraum 2016/2017 Grafik: Elke Reuschel

Danksagung

Die Autoren des Beitrags bedanken sich für die vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit beim Auftraggeber der Untersuchungen, dem Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Herrn Höhne und Herrn Franke, sowie beim Lehrbereich Vermessung der HTWK Leipzig, Herrn Prof. Dr.-Ing. Weferling und Herrn M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Evers, und bei den Sportlehrern der HTWK, Herrn Pausch und Herrn Schiffler.

Literatur

- [1] Quade, J.; Reuschel, E.: Filigrane Spannbetonfertigteile. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 1706696 des BMF, 11/1997, MFPA Leipzig / HTWK Leipzig.
- [2] Liedert, S.; Kraus, S.: Heidebroek-Bau der Technischen Universität Dresden –Ertüchtigung und Instandsetzung des vorgespannten Faltwerkdachs. Bautechnik 86 (2009) 11, S. 667–676.
- [3] Kothe, H.; Rühle, H.; Richter, B.; Biesold, J.: Faltwerkdach für eine Tunnelofenhalle aus vorgefertigten, zusammengespannten Stahlbetonelementen. Bauplanung – Bautechnik 17 (1963) 8, S. 366–371.
- [4] Schulze, C.: Beurteilung der baukonstruktiven und bauphysikalischen Gesamtsituation der Sporthalle Arno-Nitzsche-Straße der HTWK Leipzig im Hinblick auf das Problem des Tauwasserausfalls und Lösungsvorschläge zur langfristigen Sanierung. Diplomarbeit, HTWK Leipzig, 2013.
- [5] Bestandsunterlagen zur Sporthalle der HTWK, Arno-Nitzsche-Straße, zur Verfügung gestellt vom SIB.
- [6] Bauer, P.: Stellungnahme zum Wärme- und Feuchteschutz des Daches. MFPA Leipzig, GS 4.1/15-2005-3 vom 7.10.2015.
- [7] DIN EN 1991-1-3:2010-12: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung einschließlich Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12.
- [8] DIN EN 1991-1-4:2010-12: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten; Deutsche Fassung einschließlich Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Richtlinie für Belastungsversuche an Betonbauwerken. Berlin: Beuth, 9/2000.
- [10] Bauministerkonferenz: Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten, Fassung 9/2006.