

ANSCHLUSSPROJEKTE

Punktfokussierende Heliostaten aus Hochleistungsbeton | Point-focusing heliostats made from high-performance concretes

► Patrick Forman¹, Sebastian Penkert², Peter Mark¹, Jürgen Schnell²

► ¹ Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum

► ² Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, TU Kaiserslautern

Die im Teilprojekt Mark/Schnell des SPP 1542 erbrachten Entwicklungen an Parabolrinnen (siehe S. 536 ff. des vorliegenden Buches) haben gezeigt, wie aussichtsreich die Verwendung von Feinkornbetonen für die Herstellung hochpräziser, formstabiler Bauteile ist [1], [2]. Die gewonnenen Erkenntnisse und die Nachfrage aus der Solartechnik ermutigen zur Übertragung auf verwandte Anwendungsgebiete, nämlich auf Heliostate [3] unter der Leitidee einer weitgehend industrialisierten Präzisionsfertigung. Wegen der extrem hohen Wiederholungszahl gleicher oder sehr ähnlicher Fertigteile sind Heliostate für den Betonfertigteilbau auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in nahezu idealer Weise geeignet. Wesentliche Herausforderungen sind:

- die geometrische Genauigkeit, da durch die Lage des Fokuspunkts im Solarturm – bis zu hunderte Meter vom Heliostaten entfernt – die Anforderungen an die Präzision der Oberflächen gegenüber Parabolrinnen (Fokallängen von wenigen Metern) erhöht sind,
- die Adaptivität der Tragstruktur und somit auch der Herstellung (Schalungstechnik), da sich mit zunehmendem Abstand der konzentrischen Reihen um den Solarturm die Paraboloiden der Spiegelflächen öffnen, so dass im Wesentlichen gleiche, teiladaptive Fertigteile mit einzelnen geometrischen Anpassungsparametern (Parabelöffnung, Rotationspunkt des Antriebs = Bauteilschwerpunkt) zu erstellen sind und
- die Minimierung der Bewehrung (Verkürzung von Fertigungszeiten), was durch eine infolge Ringvorspannung überdrückte Strebenstruktur

Recent developments on parabolic troughs (see p. 536 seq. of this book) in Mark/Schnell's project of the SPP 1542 have shown that the use of fine-grained concrete is a promising alternative for the manufacture of highly precise components with low deformations [1], [2]. Their findings and requests in solar technology have encouraged a transfer to related fields of application, namely to heliostats [3]. The guiding principle is broadly industrialized precision manufacturing. Due to an extremely high number of identical or utmost similar precast elements, heliostats seem to be ideally suited for precast concrete construction from an economic point of view. Key challenges are:

- Geometric accuracy: since the distance to the focal point of a solar tower which is hundreds of meters away from the heliostats, the accuracy demands on the surface even increases compared to parabolic troughs with focal lengths of few meters.
- Adaptivity of the supporting structure and the production concerning formwork technology: since the paraboloid of the mirror surfaces widens with increasing distance of the concentric rows to the solar tower. Thus, almost identical and partially adaptive precast elements with individual control parameters (aperture, point of rotation of the drive = component's centre of gravity) have to be built.
- Minimisation of reinforcement (shortening of production times): This shall be achieved by struts that are pre-compressed by ring tensioning and ensure better utilized high-performance concrete.

tur und somit besseren Ausnutzung des Hochleistungsbetons erfolgen soll.

Angestrebt werden dazu kreisförmige, in Streben aufgelöste Schalenstrukturen, welche sich aus gleichen Teilsegmenten zusammensetzen. Anhand eines Demonstrators des Spiegelträgers im Originalmaßstab mit Ringvorspannung, möglicher Nachbearbeitung der Oberflächen und nachträglicher Verspiegelung, welche in ihrer Oberflächengenauigkeit vermessen wird, sollen die entwickelten Methodiken validiert werden.

In einem ersten Ansatz wurde die kreisförmige Schale – vereinfacht ohne Krümmung – als rotationssymmetrischer Kragarm mit hyperbolisch verjüngender Dicke mithilfe der Markus-Tafeln [4] modelliert. An diesem Ersatzsystem wurde eine Voroptimierung der Dicke auf analytischer Ebene durchgeführt. Diese beruht auf einer Begrenzung der Verformungen infolge Eigen- und Flächenlasten (Spiegel, Windlasten) basierend auf Genauigkeitsanforderungen der Oberflächenwelligkeit aktueller Systeme [5]. Die so ermittelte vollwandige Schale wurde dann über einen Ansatz äquivalenter Steifigkeiten in eine Strebenstruktur, welche sich aus acht gleichen Teilsegmenten zusammensetzt, überführt (Bild 1). Dieser erste Entwurf weist eine Stärke von effektiv ca. 3 cm im Mittel über die Fläche auf und bildet die Basis für Entwicklungen der Schalungstechnik einzelner Segmente. Zur Verbesserung der Oberflächengüte durch Schleifen wurden bereits Untersuchungen zum Einfluss mechanischer Abrasion auf die Festigkeit von Hochleistungsbetonproben durchgeführt. Es konnte durch den geringen Wärmeeintrag keine merkliche Reduktion der Festigkeit in 3-Punkt-Biegezugprüfungen festgestellt werden.

Weitere Entwicklungen betreffen Strukturoptimierungen auf Struktur-, Streben- und Detailebene, die Entwicklung einer geeigneten Vorspanntechnik, die Integration geometrischer Adaptivität in Entwurf und Herstellung und die Beachtung von materiellen und geometrischen Unschärfen zum robusten Strukturentwurf.

The aim is to achieve circular shell structures dissolved into struts, which are made up of the same partial segments. The developed methods are to be validated on the basis of a demonstrator of the mirror carrier in original scale with ring tensioning, possible post-processing of the concrete surface (e.g. by grinding) and subsequent mirroring, which is measured in its accuracy.

In an initial approach, the circular shell – simplified without curvature – was designed as a rotationally symmetric cantilever with hyperbolically tapered thickness using the Markus-Sheets [4]. Thereby, a first optimisation of the thickness was carried out on analytical level. To meet accuracy requirements concerning the surface waviness of current systems [5], the optimisation was restricted by limited deformations induced by self-weight and surface loads (mirrors and wind). Next, the solid shell structure was converted into a carrier structure from eight identical partial segments maintaining the stiffness (Fig. 1). This yields a first design with an effective thickness of approx. 3 cm on average (over the total surface area) which forms the starting point for the development of formwork technology of the single segments. To improve the surface quality by grinding, first investigations were already carried out. Especially the influence of mechanical abrasion on the strength of high-performance concrete samples was evaluated. Due to a quite low heat input, no significant reduction of the strength could be observed in 3-point flexural tensile tests.

Future developments include further structural optimization on structural, element and detail levels, the development of suitable tensioning techniques, an integration of geometric adaptivity in design and manufacture, and the consideration of material and geometrical uncertainties for a robust structural design.

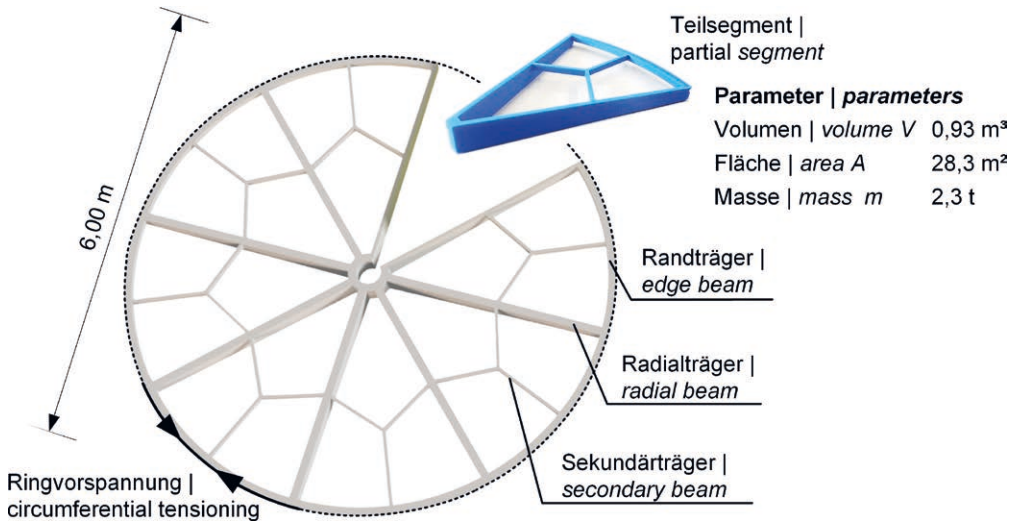


Bild 1: Vorentwurf einer rotationssymmetrischen Strebenstruktur aus acht Teilsegmenten („Tortenstücke“) mit 3D-gedrucktem Prototyp | **Fig. 1:** Conceptual design of a rotationally symmetrical beam structure consisting of eight segments („pie slices“) with prototype in 3D-printing | Graphic: Sebastian Penkert, Patrick Forman

Das Vorhaben wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und drei Hersteller bzw. Ausrüsterfirmen aktiv unterstützt.

The German Aerospace Center (DLR) and three manufacturers and suppliers are our research and industrial partners in the project.

Literatur | References

- [1] Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolschalen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051
- [2] Kämper, Ch.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS)* 58 (2017) 1, 191, S. 105–119
- [3] Pfahl, A.: Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction. *Journal of Solar Energy Engineering* 136 (2014) Febr., S. 14501-1–14501-9 – DOI: 10.1115/1.4024243
- [4] Markus, G.; Otto, J.: *Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke*. 3. Aufl., Düsseldorf: Werner, 1978
- [5] Balz, M.; Göcke, V.; Keck, T.; von Reecken, F.; Weinrebe, G.; Wöhrbach, M.: Stellio – development, construction and testing of a smart heliostat. *AIP Conf. Proc.* 1734 (2016) 1, S. 020002-1–020002-8 [Proc. of 21st SolarPACES Conf. 2015, 13.–16.10.2015 in Kapstadt (Südafrika) – DOI: 10.1063/1.4949026]

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Adaptive Präzisionsstrukturen von Heliostaten aus Hochleistungsbeton für punktfokussierende Solarkraftwerke

Pinpoint accurate adaptive structures for heliostats made from high performance concrete for central tower power plants

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Adresse Address:	Ruhr-Universität Bochum (RUB), Lehrstuhl für Massivbau, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Kontakt Contact:	+49 234 32 22700 peter.mark@rub.de http://www.massivbau.rub.de/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Adresse Address:	TU Kaiserslautern (TU KL), Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14, 67663 Kaiserslautern
Kontakt Contact:	+49 631 205 2157 juergen.schnell@bauing.uni-kl.de http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau/home/
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer Project number: 389020360)
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2018–30.06.2020
Team Team:	Patrick Forman (RUB) Sebastian Penkert (TU KL) Marius Schellen (TU KL)
Partner Partners:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Solarforschung, Punktfokussierende Systeme, Stuttgart Durcrete GmbH, Limbur Innogrations GmbH, Bernkastel-Kues Almecco GmbH, Bernburg