

Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke | Light-weight shape-optimised shell structures made from high-performance concrete for collector modules of parabolic trough power plants

- ▶ Christoph Kämper¹, Tobias Stallmann², Patrick Forman¹, Jürgen Schnell², Peter Mark¹
- ▶ ¹ Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum (RUB)
- ▶ ² FG Massivbau und Baukonstruktion, Technische Universität Kaiserslautern (TU KL)

1 Einleitung

Parabolrinnen-Kraftwerke sind zurzeit die am häufigsten zum Einsatz kommende und wirtschaftlichste Technologie solarthermisch konzentrierender Systeme (*Concentrated Solar Power* – CSP) und gehören zu den linienfokussierenden Systemen [1]. In Spanien stellen die solarthermischen Parabolrinnen-Kraftwerke *Andasol 1–3* mit einer Kollektorfläche von ca. 150 Millionen m² bereits 150 MW zur Verfügung, mit denen ca. 200.000 Einwohner jährlich mit Strom versorgt werden können [2]–[4]. Das Solarfeld besteht aus ca. 150 m langen, in Reihe angeordneten Kollektoren, die aus einzelnen Parabolrinnen-Kollektormodulen zusammengefasst und im Tagesverlauf der Sonne nachgeführt werden. Die Lagerung erfolgt an den Modulrändern im Schwerpunkt des Kollektormoduls, der mit der Rotationsachse zusammenfällt. Bisher werden die Kollektoren überwiegend als filigranes Stahlfachwerk mit über die Aperturweite parabelförmig, uniaxial gekrümmten und punktuell gestützten Spiegelementen ausgeführt. Bei der Assemblierung der Stahlfachwerke und der Spiegelemente ist schon im Bauzustand durchgehend eine hohe Präzision gefordert, um eine maximale Solarstrahlenkonzentration der einfallenden direkten

1 Introduction

Parabolic trough power plants are currently the most frequently used and most economical technology of solar thermal systems (*Concentrated Solar Power* – CSP) and belong to the linear focus collector types [1]. In Spain, the solar thermal parabolic trough power plants *Andasol 1–3* with a collector area of approx. 150 million m² already provide 150 MW, which means that approx. 200,000 inhabitants can be annually supplied with electricity [2]–[4]. The solar field consists of approx. 150 m long collectors arranged in rows, which are combined from individual parabolic trough collector modules and track the sun during the course of the day. The bearings are located at the edges of the module in the centre of gravity of the collector module, which corresponds to the axis of rotation. Up to now, the collectors have mainly been designed as a steel framework with parabolic, uniaxially curved and pointwise supported mirror elements. During the assembly of the steel framework and the mirror elements, high precision is required throughout the manufacturing in order to ensure a maximum solar radiation concentration of the incident direct solar radiation on an absorber tube located in the focal line [5]. A heat transfer medium, usually thermal oil,

solaren Strahlung auf ein in der Fokallinie befindliches Absorberrohr sicherzustellen [5]. In diesem wird ein Wärmeträgermedium, zumeist Thermoöl, auf eine Prozesstemperatur von ca. 400 °C erhitzt. In einem nachgeschalteten konventionellen Kraftwerksblock wird mittels Dampfturbine Elektrizität erzeugt. Das bisher kommerziell meist genutzte Kollektormodul ist der *EuroTrough* mit einer Aperturweite von ca. 5,80 m und einer Modullänge von 12 m [6], [7] (Bild 1), welches als Benchmark für die erste Förderphase des Projekts diene.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zielen bisherige Entwicklungen auf eine Vergrößerung der Spiegelfläche zur Steigerung des Wirkungsgrades über einen erhöhten geometrischen Konzentrationsgrad, definiert als das Verhältnis von Reflektor- zu Absorptionsfläche, ab. Module wie der *UltimateTrough* und der *SpaceTube* erreichen dies durch die Vergrößerung der Aperturweite auf 7,5 m bzw. 8 m [8], [9]. Ein alternatives Strukturkonzept aus stahlfaserverstärkten Betonfertigteilen der Schweizer Firma *Airlight* mit einer Aperturweite von 9,7 m besteht aus durch Luftdruck in parabolische Form gebrachten Spiegelfolien als Reflektorsystem und wurde bisher in einem Pilot-Kraftwerk in Ait-Baha, Marokko, umgesetzt [10]. Wesentliche Arbeiten der zweiten Förderphase sind daher – dem Trend zu größerer Apertur folgend – an der visionären Entwicklung von Parabol-schalen mit Öffnungsweiten von bis zu 10 m ausgerichtet.

is heated to a process temperature of approx. 400 °C in the absorber tube. Electricity is generated in a downstream conventional power plant unit by means of a steam turbine. The most commercially used collector module is the *EuroTrough* with an aperture width of approx. 5.80 m and a module length of 12 m [6], [7] (Fig. 1), which served as a benchmark for the first funding phase of the project.

In order to improve economic efficiency, previous developments have aimed to increase the size of the mirror surface in order to increase efficiency by a higher geometric degree of concentration, defined as the ratio of reflector surface to absorption surface. Modules like the *UltimateTrough* and the *SpaceTube* achieve this by increasing the aperture width to 7.5 m or 8 m, respectively, [8], [9]. An alternative structural concept consisting of prefabricated steel fibre-reinforced concrete elements from the Swiss company *Airlight* with an aperture width of 9.7 m consists of parabolic mirror foils as a reflector brought into parabolic shape by air pressure and has already been implemented in a pilot power plant in Ait-Baha, Morocco [10]. Therefore, in line with the trend towards a larger aperture, major work in the second funding phase aims at the visionary development of parabolic shells with aperture widths of up to 10 m.

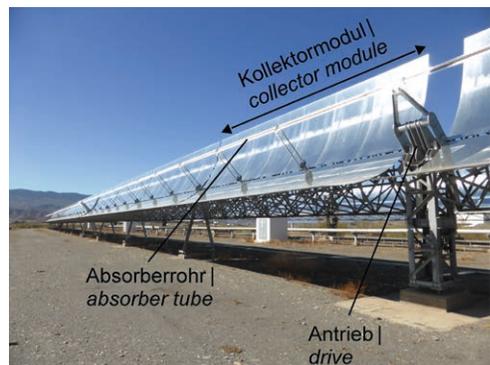


Bild 1: *EuroTrough*-Kollektormodule auf dem Testfeld der Forschungseinrichtung „CIEMAT Plataforma Solar“ | **Fig. 1:** *EuroTrough* modules at the testing area of the research facility “CIEMAT Plataforma Solar”

2 Ziele und Strategie

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Tragkonstruktionen für Parabolrinnen-Kollektormodule aus Hochleistungsbeton zu entwickeln. Dies soll durch einen mehrstufigen (Konzept-, Struktur-, Bauteil-, Detailebene), interaktiven (Numerik und experimentelle Umsetzung) sowie interdisziplinären (Solartechnologie, Windingenieurwesen, Betontechnologie, Fertigteilbau, Ingenieurinformatik) Entwicklungsprozess gelingen. Es entstehen so besonders leichte, verformungsarme Strukturen, die unter Einhaltung von Verformungsrestriktionen streng am Prinzip *form follows force*, also am Kraftfluss, orientiert sind. Das methodische Gesamtkonzept beinhaltet sowohl Designprinzipien und numerische sowie experimentelle Methoden als auch die generelle praktische Realisierung von Parabolrinnen-Kollektormodulen aus Hochleistungsbeton.

Dazu wurden im Einzelnen folgende Aspekte erarbeitet:

1. Ableitung von Kriterien zur Genauigkeitsbewertung der Schaleninnenfläche (Abschnitt 3),
2. Entwicklung kleinformatiger Strukturkonzepte mit Abmessungen vom Typ *EuroTrough* (Förderphase I) und „upsizing“ auf großformatige Kollektormodule bis 10 m Aperturweite (Förderphase II) unter Berücksichtigung der Designprinzipien aus Förderphase I (Abschnitt 4),
3. Entwicklung parametrisierter, numerischer Modelle (Abschnitt 5) und Herleitung spezifischer Einwirkungen (Abschnitt 6),
4. Konzepte zur Multilevel-Optimierung und Ableitung von Methoden zur robusten Analyse (Abschnitt 7),
5. Weiterentwicklung der Betontechnologie, Bewehrungs- und Schalungstechniken (Abschnitt 8),
6. Experimentelle Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit an Ersatzsystemen aus Hochleistungsbeton mit integrierten Hohlkörpern (Abschnitt 8),
7. Realisation von Demonstratoren (Abschnitt 9).

2 Objectives and strategy

The aim of the research project is to develop supporting structures for parabolic trough collector modules made of high-performance concrete. This is to be achieved through a multi-level (concept, structure, component, detail), interactive (numerics and experimental realisation) and interdisciplinary (solar technology, wind engineering, concrete technology, precast construction, building informatics) development process. This result in particularly lightweight, low-deformation structures that are strictly oriented towards the principle of *form follows force* while complying with deformation restrictions. The overall methodological concept includes design principles and numerical and experimental methods as well as the general practical implementation of parabolic trough collector modules made of high-performance concrete.

The following aspects were elaborated in detail:

1. Derivation of an accuracy criterion for the inner surface of the shell (section 3),
2. Development of small-scale structural concepts with *EuroTrough* type dimensions (funding phase I) and upsizing to large-format collector modules up to 10 m aperture width (funding phase II) taking into account the design principles from funding phase I (section 4),
3. Development of parameterised numerical models (section 5) and derivation of specific action effects (section 6),
4. Concepts for multi-level optimisation and derivation of robust analysis methods (section 7),
5. Further development of concrete technology, reinforcement and formwork techniques (section 8),
6. Experimental investigation of the shear strength of equivalent systems made of high-performance concrete with integrated void formers (section 8),
7. Realisation of demonstrators (section 9).

3 Herleitung eines Wirksamkeitskriteriums (RUB)

Die Leistung eines Solarfeldes hängt vom Verhältnis der solaren, einfallenden Energie zu tatsächlich absorbiertener Energie ab. Im Fall eines Kollektormoduls entspricht dies der reflektierten zur absorbierten direkten Solarstrahlung. Um eine maximale Solarstrahlenkonzentration sicherzustellen, muss die Reflektorfläche möglichst verformungsarm sein.

Der Querschnitt eines Parabolrinnenkollektors besitzt im idealen, also undeformierten, Zustand die Form einer Parabel, welche durch die Fokallänge f definiert ist (Bild 2, links). Diese beschreibt den Abstand zwischen Parabelursprung und dem Fokal- bzw. Konzentrationspunkt der Parabel. Im Fokuspunkt bündeln sich alle orthogonal einfallende Strahlen, die auf der idealen Parabeloberfläche reflektiert wurden. Hier ist das Absorberrohr angeordnet – bestehend aus Receiver und Schutzhülle, die zur Reduzierung von thermischen Verlusten ein Vakuum erzeugt. Die geometrische Form eines Parabelsegments kann eindeutig über den Öffnungswinkel φ_r , die Öffnungsweite w und die Fokallänge f beschrieben werden.

Die Wirksamkeit eines Solarfeldes hängt maßgeblich von der Formbeständigkeit der Reflektorfläche in Querrichtung ab und wird anhand der optischen Wirksamkeit definiert. Verformungen in Längsrichtung sind vernachlässigbar, da diese in Abweichungen der Solarstrahlen entlang der Fokallinie resultieren. Um die infolge äußerer Einflüsse sowie zeitlicher und initialer Formabweichungen auftretenden Verformungen einer Parabolschale hinsichtlich der Solarstrahlenkonzentration zu bewerten, wurde ein optisches Wirksamkeitskriterium hergeleitet. Es beruht auf einer Wichtung der Abweichung der reflektierten Solarstrahlen zum Fokuspunkt in Abhängigkeit des Absorberrohrdurchmessers d . Die aus einer verformten Reflektoroberfläche bezüglich einer idealen Parabelform resultierenden Winkelfehler Θ (vgl. Bild 2, links) der reflektierten Solarstrahlen werden mithilfe einer Wichtungsfunktion f_{PT} (Gl. 1) nach [11] bewertet.

3 Derivation of an efficiency criterion (RUB)

The performance of a solar field depends on the ratio of incident solar energy to actually absorbed energy. In the case of a collector module, this corresponds to the reflected direct solar radiation absorbed. In order to ensure a maximum concentration of solar radiation, the deformation of the reflector surface must be as low as possible.

The cross-section of a parabolic trough collector has the shape of a parabola in the ideal, i.e. undeformed, state, which is defined by the focal length f (Fig. 2, left). The focal length describes the distance between the vertex and the focal or concentration point of the parabola. In the focal point, all orthogonally incident rays that are reflected on the ideal parabola surface are concentrated. Here the absorber tube is arranged – consisting of receiver and protective cover, which generates a vacuum to reduce thermal losses. The geometric shape of a parabola segment can be clearly described by the rim angle φ_r , the aperture width w and the focal length f .

The efficiency of a solar field depends significantly on low deformations of the reflector surface in transverse direction and is defined by the optical efficiency. Deformations in the longitudinal direction are negligible because they result in deviations of the solar rays along the focal line. In order to evaluate the deformations of a parabolic shell occurring due to environmental conditions as well as temporal and initial shape deviations with regard to the solar radiation concentration, an optical efficiency criterion was derived. It is based on a weighting of the misalignment of the reflected solar rays from the focal point depending on the absorber tube diameter d . The slope errors Θ (cf. Fig. 2, left) of the reflected solar rays resulting from a deformed surface with respect to an ideal parabolic shape are evaluated using a weighting function f_{PT} , Eq. (1) acc. to [11].

$$f_{PT} = \begin{cases} 1 & \text{für } |\theta| < \theta_1 \\ \cot \frac{\varphi_r}{2} \left(\frac{2 \tan \frac{\varphi_r}{2}}{C \cdot \Theta} - 1 \right) & \text{für } |\theta| < \theta_1 < \theta_2 \\ 0 & \text{für } |\theta| < \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

Der geometrische Konzentrationsgrad C ist dabei das Verhältnis zwischen Öffnungsweite w und Receiverrohrdurchmesser d . Der Akzeptanzhalbwinkel θ_1 entspricht dem Winkel, für den die am Parabelrand einfallenden Solarstrahlen noch gerade das Receiverrohr treffen; θ_2 ist das entsprechende Pendant für den Parabelscheitel. Das heißt, jede Strahlabweichung kleiner θ_1 erzielt eine volle optische Wirksamkeit. Jegliche Winkelfehler, die größer sind, haben lediglich eine abgeminderte oder keine Wirksamkeit. Die so bestimmten lokalen Wirksamkeiten werden zur Ermittlung der gesamten optischen Wirksamkeit η eines Kollektormoduls über die projizierte Kollektorfläche aufintegriert. Zur Bewertung des Schalendesigns dienen dabei Mittelwert μ und Standardabweichung σ der Häufigkeitsverteilungen des Winkelfehlers, welche mit einer Normalverteilung approximiert sind. Volle Wirksamkeit tritt auf, wenn alle Winkelfehler innerhalb des Akzeptanzhalbwinkels θ_1 verbleiben. Bild 2 (rechts) zeigt exemplarisch die Häufigkeitsverteilung mit überlagerter Akzeptanzfunktion zur Bewertung der Kollektorwirksamkeit.

The geometrical concentration ratio C is the ratio between aperture width w and receiver tube diameter d . The acceptance half angle θ_1 corresponds to the angle at which the solar rays incident at the parabolic edge are still focused on the receiver tube; θ_2 is the corresponding counterpart for the parabolic vertex. In other words, each beam deviation of less than θ_1 achieves full optical efficiency. Any slope errors that are larger will only have a reduced or no effectiveness. These local efficiencies are integrated over the projected collector surface to determine the overall optical efficiency η of a collector module. The mean value μ and standard deviation σ of the probability distributions of the slope errors, which are approximated with a normal distribution, are used to evaluate the shell design. Full efficiency occurs when all angular errors remain within the acceptance half-angle θ_1 . Fig. 2 (right) shows an example of the probability distribution with a superposed acceptance function for evaluating the collector efficiency.

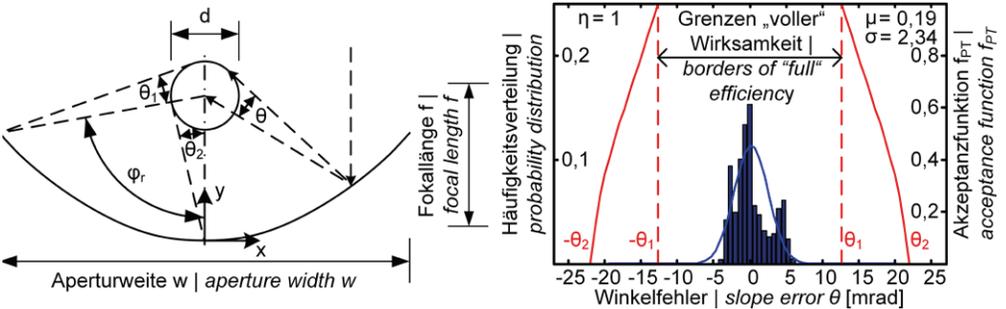


Bild 2: Geometrische Beziehung im Querschnitt einer Parabolrinne mit zylindrischem Receiver (links) und Genauigkeitsanalyse (rechts) | Fig. 2: Geometry and slope error parameters in cross-section based on a cylindrical absorber tube (left) and accuracy analysis (right)

4 Entwicklung von Strukturkonzepten (RUB)

Als Startkonfiguration für die Strukturfindung der ersten Förderphase wurden die Abmessungen des *EuroTrough*-Moduls mit einer Apertur von ca. 5,80 × 12,00 m gewählt (Bild 3, links). Wesentlicher Nachteil dieser und auch anderer Stahlfachwerkstrukturen mit punktuell aufgelagerten Spiegelementen ist die Trennung von Tragstruktur und Spiegelfläche, da Formabweichungen beider Strukturen sich superponieren. In diesem Projekt sollen daher Trag- und Reflektorstruktur zu einem verformungsarmen Schalentragwerk aus Hochleistungsbeton zusammengeführt werden (Bild 3, rechts). Dabei werden hohe Anforderungen an die Güte der Schalenoberfläche der uniaxial gekrümmten Betonschale gestellt, denn mit dieser werden über die gesamte Modullänge die Reflektorelemente, z. B. Spiegelfolie oder flexible Dünnglasspiegel, kontinuierlich flächig verbunden, sodass eine Eigensteifigkeit der bisher punktuell gestützten Spiegelemente nicht mehr erforderlich ist. Verformungen der Schalenstruktur wirken sich so direkt auf die verspiegelte Oberfläche aus und dienen als Inputgrößen für Genauigkeitsanalysen zur optischen Wirksamkeit. Ein primärer uniaxialer Lastabtrag, getrennt für Quer- und Längssystem, wie beim *EuroTrough* weicht einem multiaxialen Lastabtrag der dünnwandigen Schalenkonstruktion, die es zulässt, einen optimalen Kraftfluss auszubilden und Membrantragwirkungen zu aktivieren.

4 Development of structural concepts (RUB)

The dimensions of the *EuroTrough* module with an aperture of approx. 5.80 × 12.00 m were chosen as the starting configuration for the conceptual design finding in the first funding phase (Fig. 3, left). An essential disadvantage of this and other steel framework structures with pointwise supported mirror elements is the separation of supporting structure and mirror surface, since deformations of both structures superpose each other. In this project, the load-bearing and reflector structure are merged to a low-deformation shell made from high-performance concrete (Fig. 3, right). High demands are set on the surface quality of the uniaxially curved concrete shell, because the reflector elements, e.g. mirror foil or flexible thin glass mirrors, are continuously glued to the shell over the entire module length, so that the inherent rigidity of the previously point-supported mirror elements is no longer required. Thus, deformations of the shell structure have a direct effect on the mirrored surface and serve as input variables for accuracy analyses of the optical efficiency. A primary uniaxial load transfer, separated for transverse and longitudinal systems as with the *EuroTrough*, is replaced by a multiaxial load transfer of the thin-walled shell structure, which allows an optimal flow of forces and activation of membrane load capacity.

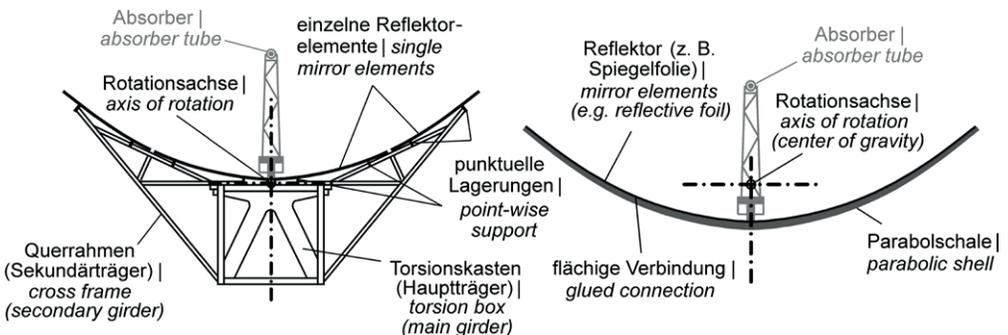


Bild 3: Querschnitt des *EuroTrough*-Moduls (links) und Konzept des Querschnitts einer parabolisch gekrümmten, einwandigen Betonschale (rechts) | Fig. 3: Cross-section of the *EuroTrough* module (left) and concept of the cross-section of the thin-walled parabolic concrete shell (right)

Für ein Strukturkonzept der Betonschale nach Vorbild des *EuroTrough*-Moduls wurde in der ersten Phase ein Initialmodell entwickelt, welches die wesentlichen Tragmechanismen von Tonnenschalen adaptiert. Um zusätzlich hohen Verwölbungen entgegenzuwirken, wurden als ingenieurtechnisch sinnvolle Ad-hoc-Optimierungsansätze Randverstärkungen an den Längsseiten, Zugbänder mit korrespondierenden Queraussteifungen auf der Schalenrückseite in den Viertelpunkten sowie Seitenschotte an den offenen Enden der Parabolschale, die gleichzeitig eine Lagerung im Schwerpunkt der Schale garantieren, vorgesehen (Bild 4, links). Mögliche Rippenverstärkungen auf der Schalenunterseite als Diagonalverband können zudem den Torsionswiderstand sowie die Struktursteifigkeit der dünnwandigen Schale erhöhen, wodurch zusätzlich die (effektive) Schalendicke reduziert werden kann [12].

For a structural concept of the concrete shell based on the *EuroTrough* module, an initial model was developed in the first phase which adapts the essential load-bearing mechanisms of barrel shells. In order to avoid additional warping, first 'ad hoc' optimisation approaches included edge strengthening on the long sides, tension ties with corresponding transverse strengthening on the backside of the shell at the quarter points and side bulkheads at the open ends of the parabolic shell, which at the same time guarantee a bearing in the centre of gravity of the shell (Fig. 4, left). Possible diagonal ribs on the backside of the shell can also increase the torsional stiffness as well as the structural rigidity of the thin-walled shell, which can additionally reduce the (effective) shell thickness [12].

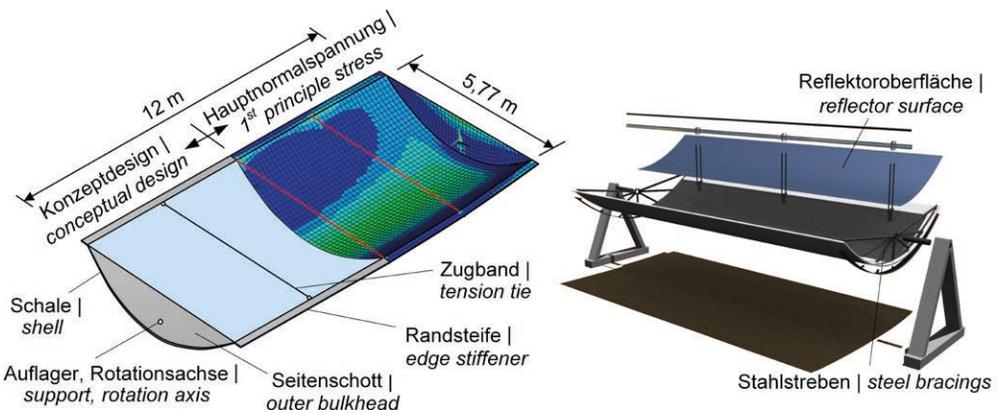


Bild 4: Strukturkonzepte; links: Tonnenschale, rechts: hybride Struktur mit Speichenradkonstruktion aus Stahl als Endauflager eines Moduls mit Rotationsachse im Schwerpunkt | **Fig. 4:** Structural concepts; left: barrel vault shell, right: hybrid structure with steel bracings for the support of a module with axis of rotation in the center of gravity

Zur Minimierung von Verschattungsverlusten durch die vollflächigen Seitenschotte können lokal hybride Konstruktionskonzepte herangezogen werden, bei denen primäre und sekundäre Strukturelemente material- und beanspruchungsspezifisch getrennt eingesetzt werden. Dazu wird bspw. die dünnwandige Betonschale schubfest mit einer Speichenradkonstruktion aus Stahlstreben als Endelement zur Lagerung verbunden (Bild 4, rechts). Der Verschattungseffekt des massiven Endschottes wird so wesentlich reduziert.

In order to minimise shading losses due to the fully enclosed side bulkheads, local hybrid design concepts can be used, in which primary and secondary structural elements are used separately for both material and loads. For this purpose, the thin-walled concrete shell is rigidly connected to a spoke wheel construction made of steel struts as an end element for bearing (Fig. 4, right). This significantly reduces the shading effect of the solid bulkhead.

Neben der Lagerung der Schalenstruktur im Schwerpunkt des Parabelquerschnitts wurde eine linienartige Abrolllagerung entwickelt. Hierbei verbleibt der Schwerpunkt des Parabelquerschnitts während des Abrollvorgangs auf einer horizontalen Achse, sodass rechnerisch keine mechanische Arbeit infolge Auf- oder Absenkens der Schale zu verrichten ist (Bild 5). Dazu werden an der Rückseite der Schale kreisförmige Sichelelemente appliziert, die auf einem Lagerelement mit der geometrischen Form einer verkürzten Zykloide abrollen. Mithilfe von ineinandergreifenden Zahnrädern wird ein Abrutschen der Schale verhindert. Dieses patentierte Lagerungskonzept [13] bildet die Grundlage für den Transfer auf Strukturen großer Aperturweite zur Erhöhung des Konzentrationsgrades, wie z. B. der 7,5 m × 24 m große *UltimateTrough* [8].

In addition to the bearing of the shell structure in the centre of gravity of the parabolic cross section, a linear roll-off bearing was developed. Thereby, the centre of gravity of the parabolic cross section remains on a horizontal line during the rolling process, so that no mechanical work is needed to raise or lower the shell (Fig. 5). For this purpose, circular sickle elements are applied to the back of the shell, which roll on a bearing element with the geometric shape of a reduced cycloid. Interlocking gears prevent the shell from slipping. This patented bearing concept [13] serves as a basis for structures with large aperture widths to increase the concentration ratio, such as the *UltimateTrough* with an aperture of 7.5 m × 24 m [8].

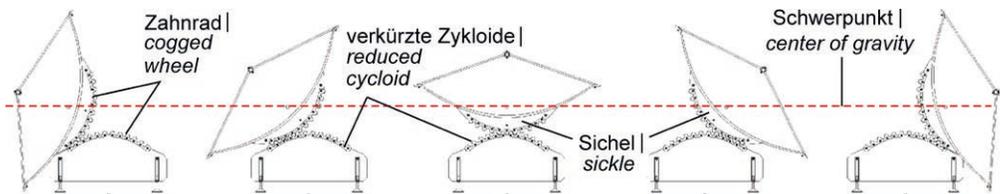


Bild 5: Prinzip der Abrolllagerung | Fig. 5: Principle of the rocker bearing mechanism

Zunehmende Aperturweiten erfordern allerdings erhöhte Wandstärken im Scheitel und an den Rändern, um eine entsprechende Struktursteifigkeit zu gewährleisten. Um gleichzeitig Material einzusparen, bietet es sich an, den Voll- in einen Hohlquerschnitt aufzulösen. Als Basiskonfiguration wurde ein Kollektormodul mit 10 m Aperturweite als vielzellige Hohlstruktur nach dem Prinzip einer Gitterschale [14], [15] mit Wandstärken von wenigen Zentimetern und oberer (Reflektorfläche) sowie unterer Schale entwickelt (Bild 6, links). In Längsrichtung wird hohe Struktursteifigkeit allein durch die mehrzellige Hohlkastenstruktur gewährleistet. Die Längsrippen in moderatem Abstand dienen überwiegend der Schubübertragung. Eine dichtere Anordnung erfolgt im Auflagerbereich mit annähernd punktueller Lasteinleitung an den Sichelrändern. In Querrichtung gewährleisten Rippen in vergleichsweise geringem Abstand die Quersteifigkeit, um die Formbeständigkeit der Parabel zu garantieren.

However, increased aperture widths require increased wall thicknesses at the vertex and edges to ensure structural stiffness. In order to save material at the same time, it is convenient to convert the full cross-section into a hollow cross-section. As a basic configuration, a collector module with an aperture width of 10 m was developed as a multi-core hollow structure according to the principle of grid shells [14], [15] with wall thicknesses of a few centimetres and an upper (reflector surface) as well as a lower shell (Fig. 6, left). In the longitudinal direction, high structural rigidity is ensured solely by the multi-core hollow structure. The longitudinal ribs in moderate spacing are mainly used for the transfer of shear loads. In contrast, a closer alignment is set in the supporting area with almost punctual load transfer at the sickle ends. In the transverse direction, ribs in comparatively small distances ensure the transverse rigidity to guarantee the deformation resistance of the

ren. Der mehrzellige Hohlkasten besitzt einen hohen Torsionswiderstand und reduziert über die Länge aufsummierte Verdrillungen stark.

Ein fertigungstechnisch leistungsfähigeres Designkonzept, welches das Konzept der mehrzelligen Gitterstruktur adaptiert, ist die Verwendung von Verdrängungskörpern (Bild 6, rechts). Die bereits im Hochbau verwendeten Hohlkörper in Form von rotationssymmetrischen Volumenkörpern wie z. B. Kugeln oder abgeflachte Ellipsoide werden zwischen der oberen und unteren Bewehrung angeordnet [16]–[18]. Solche Hohlkörper können zu Reihenmodulen bzw. Körben zusammengefasst werden, was eine einfache Installation während der Bauphase ermöglicht und den bei geometrisch komplexen Bauteilen aufwändigen Schalungsbau merklich reduziert. Der Anwendungstransfer auf Kollektormodule mit großen Aperturweiten gelingt dabei mit nur geringen Anpassungen im Vergleich zu einer Deckenkonstruktion. Dies betrifft sowohl die Schale selber durch ihre einachsige Krümmung gegenüber Platten als auch die Anpassung der Hohlkörper in Größe und Form aufgrund von meist verjüngenden Querschnitten der Parabol-schalenmodule zum Rand [19], [20]. Bei Verwendung bereits vorhandener Hohlkörperformen werden im Scheitelbereich vorwiegend Kugeln, am Parabelende vorzugsweise abgeflachte Ellipsoide eingesetzt (Bild 6, rechts).

parabola. The multi-core hollow structure has a high torsional stiffness and greatly reduces rotations accumulated over the collector length.

A more efficient design concept in terms of manufacturing technology, which adapts the concept of the multi-core grid structure, is the use of void formers (Fig. 6, right). The void formers, already used in building construction in the form of rotationally symmetrical elements such as spheres or flattened ellipsoids, are arranged between the upper and lower reinforcement [16]–[18]. Such void formers can be combined into row modules or baskets, which enables simple installation and noticeably reduces the costly formwork required for geometrically complex structures. The adaptation to collector modules with large aperture widths is possible with only minor adjustments compared to a slab. Both, the shell itself is affected by its uniaxial curvature compared to slabs as well as the adaptation of the void formers in size and shape due to mostly tapered cross-sections of parabolic shells [19], [20]. If already existing void formers are used, spheres are predominantly used in the vertex and flattened ellipsoids are preferred at the parabola edge (Fig. 6, right).

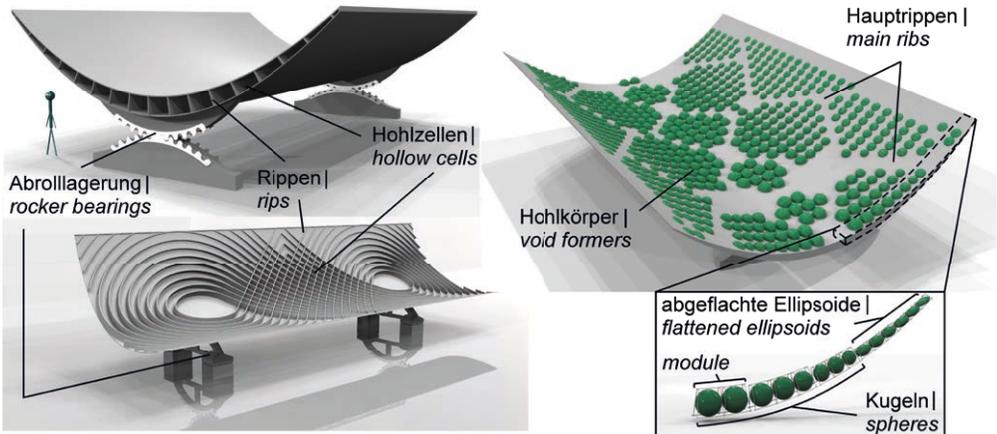


Bild 6: Strukturkonzepte für großformatige Kollektormodule; links: Rippen rechtwinklig zueinander oder dem Hauptspannungsverlauf folgend, rechts: mit Hohlkörpern | **Fig. 6:** Structural concepts for large-aperture collector modules; left: orthogonal stiffeners or acc. to the principle stresses, right: with embedded void formers (right)

5 Numerische Modellierung und Restriktionen (RUB)

Zur Simulation der Verformungen und Spannungen wurden parametrisierte Finite-Elemente-Modelle erstellt, welche sich an die entwickelten Strukturkonzepte nach Vorbild des *EuroTroughs* und an großformatigen Modulen mit Aperturweiten von ca. 10 m orientieren. Um die Reflektionsoberfläche unverzerrt wiederzugeben, wurde die virtuelle Schale bei kleinformatigen Modulen durch 8-knotige Kontinuumschalenelemente mit je 3 Translationsfreiheitsgraden je Knoten aufgebaut, wodurch Dickenänderungen auf die Unterseite der Schale verlegt werden können. Die Randverstärkungen, Seitenschotte sowie äußere Rippenverstärkungen (Quer- und/oder Diagonalaussteifungen) wurden mit 4-knotigen ebenen Schalenelementen mit je 3 Translations- und Rotationsfreiheitsgraden je Knoten modelliert. Die Zugbänder bestehen aus 3D-Stebelementen (vgl. Bild 4, links).

Großformatige Module mit Hohlzellen wurden mit 4-knotigen, ebenen Schalenelementen und reduzierter Integration modelliert. Da nur geringe Wandstärken vorhanden sind, werden sie sowohl für die Deckschichten als auch für die Rippen in Form eines Mittellinienmodells mit Überlappung verwendet. Für Modelle mit integrierten Hohlkörpern werden über den Querschnitt Layer angeordnet, sodass der Effekt integrierter Hohlkörper verschmiert über die Höhe durch effektive Steifigkeitswerte berücksichtigt werden kann. Die an der Unterseite der Schale applizierten, kreisförmigen Sichel-elemente wurden ebenfalls mit den bereits beschriebenen ebenen Schalenelementen modelliert und für die Definition der Auflagerbedingungen zwischen Sichel und Lagerelement herangezogen (Bild 7).

Materielle Restriktionen ergaben sich durch Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sowie v. a. aus der zentrischen Zugfestigkeit des Betons, um große Verformungen infolge eines gerissenen Zustands II zu vermeiden. Die numerisch angesetzten Materialparameter wurden an der TU Kaiserslautern experimentell ermittelt

5 Numerical modelling and restrictions (RUB)

For the simulation of deformations and stresses, parameterised finite element models were developed, which are based on the geometrical parameters of the *EuroTrough* and large-scale modules with an aperture width of approx. 10 m. In order to build up the reflective surface undistorted, the virtual shell of small-scale modules was modelled by 8-noded continuum shell elements with 3 degrees of freedom of translation per node, whereby thickness changes can be transferred to the backside of the shell. The edge stiffeners, side bulkheads and outer ribs (transverse and/or diagonal stiffeners) were modelled with 4-noded shell elements with 3 degrees of freedom in translation and rotation per node. The tension ties consist of 3D truss elements (cf. Fig. 4, left).

Large-scale modules with hollow cores were modelled with 4-node shell elements and reduced integration. Since only small thicknesses occur, they are used for both the cover layers and the ribs as a midline model with overlap. For models with integrated void formers, layers are arranged over the cross-section so that the effect of integrated void formers is smeared over the height and is integrated by effective stiffness values. The circular sickle elements applied to the backside of the shell were also modelled with the shell elements already described and used to define the support conditions between the sickle and the bearing element (Fig. 7).

Material restrictions are based on the compressive strength and the modulus of elasticity as well as the axial tensile strength of the concrete in order to avoid large deformations due to a cracked state II. The numerically applied material parameters were determined experimentally at the TU Kaiserslautern (Table 1). The restrictive, effective axial tensile strength [12], [21] was derived from the bending tensile strength. For operating state, the cross-section must remain mathematically in a non-cracked state, so that the numerical simulation is based on a linear-elastic material model. On the geometric

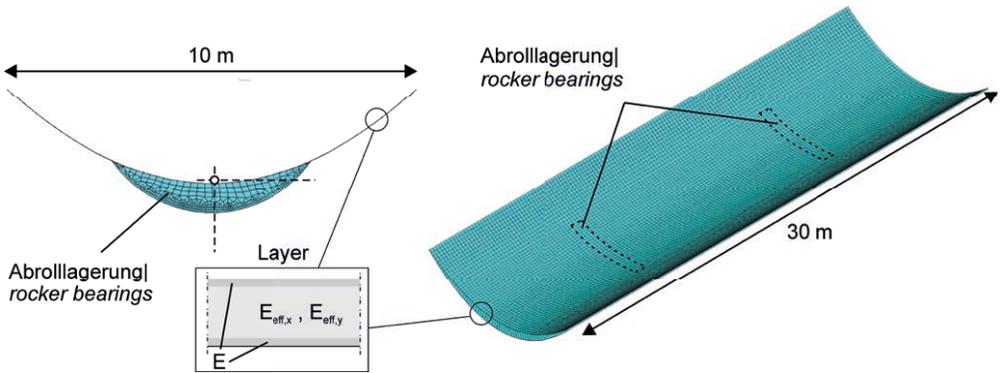


Bild 7: Numerisches Modell für großformatige Kollektormodule mit Layeransatz | **Fig. 7:** Numerical model for large-scale collector modules with layered cross-section

Parameter Parameter	Wert Value	Modellanwendung Use in the model
Elastizitätsmodul Young's modulus	47.600 N/mm ²	x
Biegezugfestigkeit Flexural tensile strength	15 N/mm ²	
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	109 N/mm ²	
Dichte Density	2524 kg/m ³	x
Zentrische Zugfestigkeit Axial tensile strength f_{ct}	7,75 N/mm ²	
Effektive zentrische Zugfestigkeit Effective axial tensile strength $\alpha_{ct,pl} \cdot f_{ct}$	6,20 N/mm ²	x

Tabelle 1: Festbetoneigenschaften (Mittelwerte) von Nanodur® (TU Kaiserslautern) und Zuordnung der Parameter auf Modellebene | **Table 1:** Mean values of the hardened Nanodur® concrete (TU Kaiserslautern) and parameters used for numerical analysis

(Tab. 1). Die restriktive, effektive zentrische Zugfestigkeit [12], [21] wurde aus der Biegezugfestigkeit bestimmt. Für den Betriebszustand ist ein Verbleiben des Querschnitts im Zustand I rechnerisch zu gewährleisten, sodass die numerischen Untersuchungen auf einem linear-elastischen Materialmodell beruhen. Auf geometrischer Ebene resultieren Restriktionen aus den Anforderungen an die Verformungsarmut aufgrund der optischen Wirksamkeit, sodass geometrische Nichtlinearitäten, also große Verformungen, unberücksichtigt bleiben.

6 Spezifische Einwirkungen (RUB)

Bei Parabolrinnenkollektoren sind verschiedenste Beanspruchungsszenarien zu beachten:

- Eigen- und Windlasten (wegen der Sonnennachführung im Tagesverlauf auslenkungsbedingt),

level, restrictions result from the requirements for low deformation due to the optical efficiency, so that geometric nonlinearities, i.e. large deformations, are not considered.

6 Specific action effects (RUB)

For parabolic trough collectors, a wide variety of specific action effects have to be considered:

- dead and wind loads (variable due to sun tracking during the course of the day),
- initial pre-deformations from manufacturing processes (surface quality, waviness of the mirror elements, etc.),
- deformations from material-related time-dependent creep and shrinkage processes,
- non-linear transient temperature constraints due to high temperature differences in the course of day and year (especially in desert regions).

- initialen Vorverformungen aus Herstellungsprozessen (Oberflächengüte, Welligkeit der Spiegelemente etc.),
- Verformungen aus materialbedingten zeitabhängigen Kriech- und Schwindprozessen,
- nichtlineare instationäre Temperaturbeanspruchungen durch hohe Temperaturunterschiede im Tages- und Jahresverlauf (v. a. in Wüstenregionen).

Generell wird dabei unterschieden in:

- Betriebszustand: unter gemäßigten Windbedingungen wird eine maximale Solarstrahlkonzentration sichergestellt,
- Überlebenszustand: bei einem Böenstaudruck, der einer 50-jährigen Wiederkehrperiode genügt, wird der Kollektor aus dem Wind in Schutzposition (nach oben geöffnete Parabel) gedreht.

In general, a distinction is made between:

- operating state: a maximum solar radiation concentration is ensured under moderate wind conditions,
- survival state: at a gust pressure that is sufficient for a 50-year return period, the collector is turned into a survival position (parabola opened upwards).

6.1 Wind loads from wind tunnel tests (RUB)

Standardised wind load approaches, e.g. of the Eurocode, are usually considered conservative, as they are subjected to major simplifications for a generally valid design. For this reason, sufficiently modelled wind tunnel tests are common for special structures in order to obtain precise wind pressure distributions on the structure. To determine the very specific, quasi-static loads on parabolic trough collec-

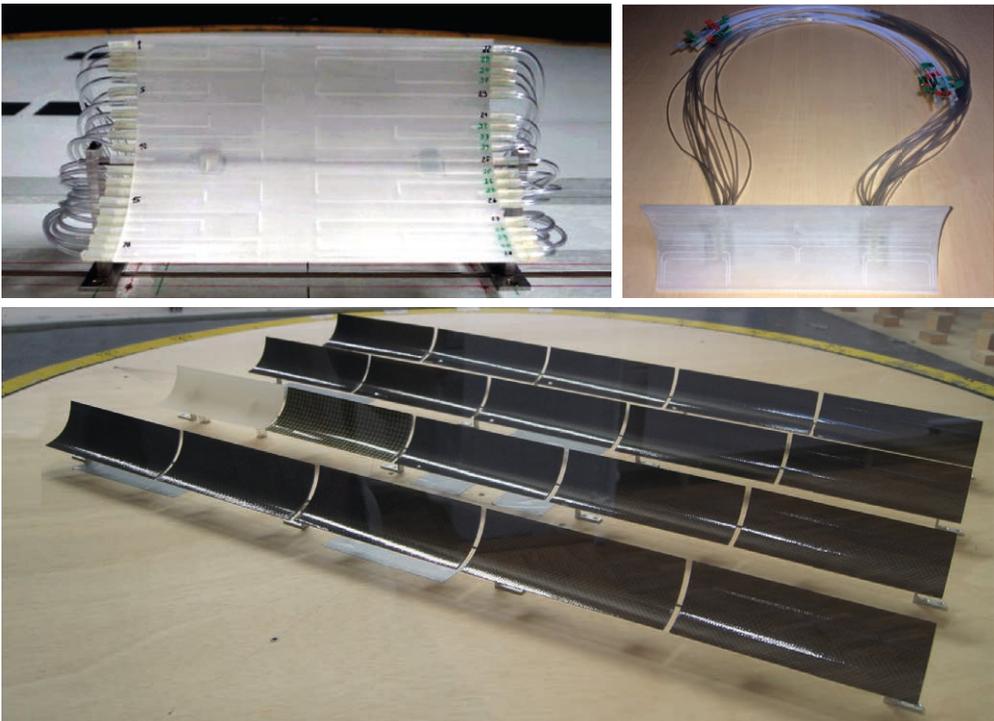


Bild 8: Windkanaluntersuchungen an skalierten, kleinformatigen (oben links) und großformatigen Kollektormodulen als Solist (oben rechts) und in Gruppenanordnung (unten) | **Fig. 8:** Wind tunnel tests on small-scaled (top left) and large-aperture collector modules as a solitary (top right) or in array arrangement (bottom)

6.1 Windwirkungen aus Windkanaltests (RUB)

Normativ geregelte Windlastansätze, z. B. des Eurocodes, gelten meist als konservativ, da sie für eine allgemeingültige Auslegung großen Vereinfachungen unterworfen sind. Daher sind für Sonderbauwerke hinreichend genau modellierte Windkanaluntersuchungen erlaubt, um genaue Winddruckverteilungen auf das Tragwerk zu erhalten. Zur Bestimmung der sehr bauteilspezifischen, quasi-statischen Beanspruchungen auf Parabolrinnen-Kollektormodule wurden umfangreiche Tests im Windkanal der Ruhr-Universität Bochum an skalierten kleinformatigen (Phase I) [22]–[26], großformatigen solitären (Phase II) sowie in Gruppenanordnung an verschiedenen Stellen positionierten (Phase II) *Rapid-Prototyping*-Modellen durchgeführt (Bild 8) [27]. Variationen waren (Bild 9):

- Kollektormodule als Solist (M 1 : 75, 1 : 150) und in Gruppenanordnung (M 1 : 150),
- Gruppenanordnung, Module am Rand und in der Mitte (jeweils Reihen 1–4),
- Windanströmungsrichtung β bzgl. Kollektorachse 0° – 180° (15° -Abstufung), Solomodul und Gruppenanordnung,
- Anstellwinkel φ : 0° (geöffnet in den Wind, \triangleq Morgen- bzw. Abendstellung), 30° , 45° , 60° , 90° (\triangleq Mittagsstellung, nach oben offen) als Solist und in Gruppenanordnung.

Die Herstellung der Modelle erfolgte mittels Stereolithographie, einer 3D-Drucktechnik mit hoher Auflösung und Präzision, welche besonders für die Ausbildung der Druckluftkanäle mit Durchmessern im Millimeterbereich erforderlich war. Durch gezielte Führung der Druckluftkanäle zu den Auflagern konnte die Messtechnik so angeschlossen werden, dass Störeffekte am Rand (Phase I, Bild 8, oben links) vermieden werden. Für das kleinformatige Modul sind die Druckmesspunkte der Vorder- und Rückseite auf getrennten Hälften angeordnet, so dass nur für die Modellhalbierende vergleichbare Druckdifferenzen für korrespondierende Druckmessstellen auf Vorder- und Rückseite ausgewertet werden konnten. Bei reihenartiger Anordnung einzelner Module zu Kollektoren können für die

tor modules, detailed tests were carried out in the wind tunnel of the Ruhr University Bochum on scaled small-scale (phase I) [22]–[26], large-scale solitary (phase II) and grouped (phase II) *rapid prototyping* models at various positions (Fig. 8) [27]. The variations were (Fig. 9):

- solitary collector modules (scale 1 : 75, 1 : 150) and in group arrangement (scale 1 : 150),
- modules at the edge and in the middle (rows 1–4), group arrangement,
- wind flow direction β with respect to collector axis 0° – 180° (15° graduation), solitary module and group arrangement,
- pitch angle φ : 0° (open to the wind attack, \triangleq morning or evening position), 30° , 45° , 60° , 90° (\triangleq noon position, open to the top), solitary module and group arrangement.

The models were produced using stereo-lithography, a 3D printing technique with high resolution and precision, which was particularly required for generating compressed air pipes with diameters in the range of millimetres. Wind flow disturbances at the edge (phase I, Fig. 8, top left) could be avoided by directing the compressed air pipes directly to the supports, where the measuring technique is connected (Fig. 8, centre). For the small-scale module, the pressure taps at the front and back sides are arranged on separate halves, so that comparable pressure differences for corresponding pressure taps could only be evaluated for the centre line. If single modules are arranged in rows to form collectors, the pressure coefficients can be assumed to be constant in the longitudinal direction for the middle position. Separate measurements in phase II were necessary to determine the pressure effects on the edge modules of a solar field.

By means of extreme value statistics, dimensionless, equivalent net pressure coefficients $c_{p,net}$ were generated from the resulting measured pressure over time, which are derived from the superposition of the pressure coefficients from front and back [28]. For the transfer to the real structure, similar conditions must exist, which are given by a true-to-scale adaptation of essential parameters of the wind flow, such as scale

mittleren Module die Druckbeiwerte als konstant in Längsrichtung angesehen werden. Für die Erfassung der Beanspruchungen von Randmodulen eines Solarfeldes waren gesonderte Messungen in Phase II nötig.

Mittels Extremwertstatistik wurden aus den gemessenen Druckzeitreihen dimensionslose, äquivalente Netto-Druckbeiwerte $c_{p,net}$ generiert, welche die Überlagerung der Druckbeiwerte von Vorder- und Rückseite beschreiben [28]. Zur Übertragbarkeit auf das reale Tragwerk müssen ähnliche Bedingungen vorherrschen, was durch eine maßstäbliche Anpassung wesentlicher Parameter des Strömungsvorgangs, wie der geometrische und zeitliche Maßstab, gegeben ist. Mithilfe der Taylor-Hypothese lässt sich der geometrische Maßstab proportional zum zeitlichen Maßstab setzen, wodurch äquivalente 10-Minuten-Böenintervalle im Windkanal bestimmt werden können [29]. Die gemessenen Druckdifferenzen werden dann

of geometry and time. By means of the Taylor hypothesis the geometric scale can be set proportional to the time scale, whereby equivalent 10-minute gust intervals in the wind tunnel are determined [29]. The measured pressure differences are then converted into pressure coefficients and split into equivalent 10-minute gusts. Each of these intervals has a maximum or minimum, which are described by an extreme value distribution according to Gumbel. In order to generate pressure coefficients sufficient for a 50-year return period, 78%-quantiles were determined with respect to Cook [28]. Similar wind tunnel tests [30] show good agreement. The pressure coefficients determined for the small-scale collector module can be assumed to be constant over the entire module length (Fig. 9, left) and simulate middle positions in the first (or last) row of a solar field with frontal wind attack ($\beta = 0^\circ$). For large-scale collector modules, distributions of the pressure coefficients over the entire module length can be derived and shadow-

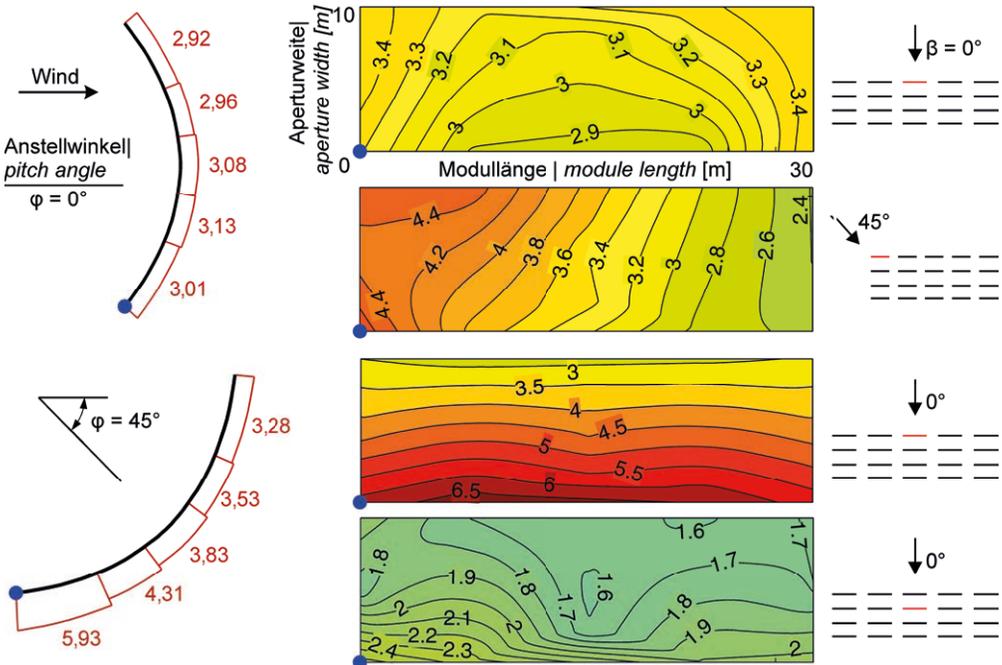


Bild 9: Verteilung der Netto-Druckbeiwerte für kleinformatige (links) und großformatige Kollektormodule (Mitte, rechts) bei ausgewählten Szenarien von β und φ | **Fig. 9:** Net pressure coefficients for small-scaled (left) and large-aperture collector modules (right) for selected angle scenarios of β and φ

in Druckbeiwerte umgerechnet und für eine Auswertung mittels Fraktilwert-Methode in äquivalente 10-minütige Böen unterteilt. Diese Intervalle haben jeweils ein Maximum bzw. Minimum, die einer Extremwertverteilung nach Gumbel unterworfen werden. Um Druckbeiwerte zu generieren, die einer 50-jährigen Wiederkehrperiode genügen, wurden nach Cook 78-%-Fraktilwerte bestimmt [28]. Ähnliche Windkanalversuche [30] zeigen eine gute Übereinstimmung. Die ermittelten Druckbeiwerte für das kleinformatige Kollektormodul können als konstant über die gesamte Modullänge angesetzt werden (Bild 9, links) und simulieren mittlere Positionen in erster (bzw. letzter) Reihe eines Solarfeldes bei frontaler Anströmung ($\beta = 0^\circ$). Für großformatige Kollektormodule können Verteilungen der Druckbeiwerte über die gesamte Modullänge angegeben sowie deutliche Windverschattungseffekte abgeleitet werden, die eine Typeneinstufung von Modulen innerhalb eines Solarfeldes erlaubt (Bild 9, rechts).

Zur Ermittlung von Windlasten w müssen die Druckbeiwerte mit dem Böenstaudruck in einer Referenzhöhe von 10 m multipliziert werden. Für den Betriebszustand wird ein Staudruck $q = 0,18 \text{ kN/m}^2$ angesetzt, was einer Windgeschwindigkeit von $v = 17 \text{ m/s}$ mit einer Windstärke von 7 Bft entspricht. Im Überlebenszustand herrscht eine Windstärke von 12 Bft ($v = 33 \text{ m/s}$) mit einem Böenstaudruck von $q = 0,68 \text{ kN/m}^2$.

Bild 10 zeigt exemplarisch die numerisch ermittelten maximalen bzw. minimalen Querbiegemomente m_{xx} über den Auflagern (Schnitte A-A, B-B) für Anstellwinkel $\varphi = 0^\circ$ und 60° infolge reiner Windbelastung für die Reihen R1–4 sowie eine Normierung auf die Maximal- bzw. Minimalwerte (M+ und M-) der ersten Reihe mit Anstellwinkel 0° . Windverschattungseffekte sind ab Reihe 2 zu erkennen, gekennzeichnet durch deutlich geringere Biegebeanspruchungen. Ähnliche Effekte lassen sich auch für die Anstellwinkel 45° und 90° ableiten. Kollektormodule am Rand erfahren eine eindeutige antimetrische Beanspruchung und sind gesondert zu untersuchen. Eine ganzheitliche Auswertung der Windkanalversu-

ing effects can be identified that allow modules to be classified within a solar field (Fig. 9, right).

In order to determine wind loads w , the pressure coefficients must be multiplied by the gust pressure at a reference height of 10 m. For the operating state, a resulting wind pressure $q = 0.18 \text{ kN/m}^2$ is assumed, which corresponds to a wind speed of $v = 17 \text{ m/s}$ equivalent to 7 Bft. In the survival state a Beaufort number of 12 ($v = 33 \text{ m/s}$) with a wind pressure of $q = 0.68 \text{ kN/m}^2$ is estimated.

Fig. 10 shows an example of the numerically determined maximum and minimum transverse bending moments m_{xx} at the supports (sections A-A, B-B) for pitch angles $\varphi = 0^\circ$ and 60° due to pure wind load for the rows R1–4 as well as a normalisation to the maximum and minimum values (M+ and M-) of the first row with a pitch angle of 0° . Shadowing effects can be detected from row 2 onwards, characterized by significantly lower bending moments. Similar effects can also be derived for the pitch angles of 45° and 90° . Collector modules at the edge clearly have antimetric loading and have to be analysed separately. A holistic evaluation of the wind tunnel tests [27] has shown that the solar field can be divided into three types:

- Type 1: collector modules in the first and last two rows with maximum wind loads predominantly from frontal (0°) and rear wind direction (180°),
- Type 2: modules at the solar field edge with non-uniform load and maximum values predominantly from a wind direction of 45° or 135° ,
- Type 3: modules in the centre of the solar field (usually from the third row onwards) with wind loads at least approx. 20% lower than type 1.

Wind flow directions between 45° and 135° are of minor importance.

6.2 Temperature constraints from climate data (RUB)

An economically reasonable operation of parabolic trough power plants is only possible at locations with a high annual direct solar irradi-

che [27] hat gezeigt, dass das Solarfeld in drei Typen eingeteilt werden kann:

- Typ I: Kollektormodule in den ersten und letzten beiden Reihen mit maximalen Windbeanspruchungen überwiegend aus frontaler (0°) und rückseitiger Windanströmung (180°),
- Typ II: Module am Solarfeldrand mit ungleichmäßiger Beanspruchung und Maximalwerte überwiegend aus einer Windanströmung von 45° bzw. 135° ,
- Typ III: Module innerhalb des Solarfeldes (meist ab der dritten Reihe) mit Windbeanspruchungen mindestens ca. 20 % geringer als bei Typ I.

Windanströmungsrichtungen zwischen 45° und 135° sind untergeordnet.

6.2 Temperaturbeanspruchung aus Klimadaten (RUB)

Ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb von Parabolrinnenkraftwerken ist lediglich an Standorten mit einer hohen jährlichen, direkten Solareinstrahlung möglich. Dies sind i. d. R. Orte, an denen hohe Temperaturen und meist auch Temperaturschwankungen vorherrschen wie z. B. in Wüsten. Dies führt zu einem ständigen Wechsel von Wärmezu- und -abfuhr und folglich zu instationären Temperaturfeldern im Tragwerk. Dabei ist ein Parabolrinnenkollektor den äußeren Witterungsbedingungen ausgesetzt, welche sich auf die Temperatur im und am Bauteil auswirken. Dieses instationäre nichtlineare Wärmeübertragungsproblem aus Wärmeleitung, kurzwelliger Sonneneinstrahlung und langwelliger Einstrahlung aus der Umgebung wurde basierend auf einem Ansatz von Temperaturverteilungen an Brückentragwerken [31] aus der Fourier'schen Differentialgleichung der Wärmeleitung hergeleitet, numerisch diskretisiert und via expliziter Zeitintegration in der Umgebung einer Tabellenkalkulation umgesetzt [32]. Mithilfe der klimatischen Randbedingungen für einen typischen Standort von Parabolrinnenkraftwerken wurde die Temperaturbeanspruchung in einer 5 cm dicken Schale simuliert und als konstante Temperaturschwankung ΔT_N und linearer Temperaturgradient ΔT_M ausge-

ation. These are usually places where high temperatures and mostly high fluctuations of temperature prevail, e.g. in deserts. This leads to a constant change of heat and consequently to transient temperature fields in the structure. A parabolic trough collector is exposed to weather conditions, which affect the temperature in and on it. This results in a transient nonlinear heat transfer problem due to heat conduction, short-wave solar radiation and long-wave radiation from the environment, which was derived by means of the Fourier differential equation of

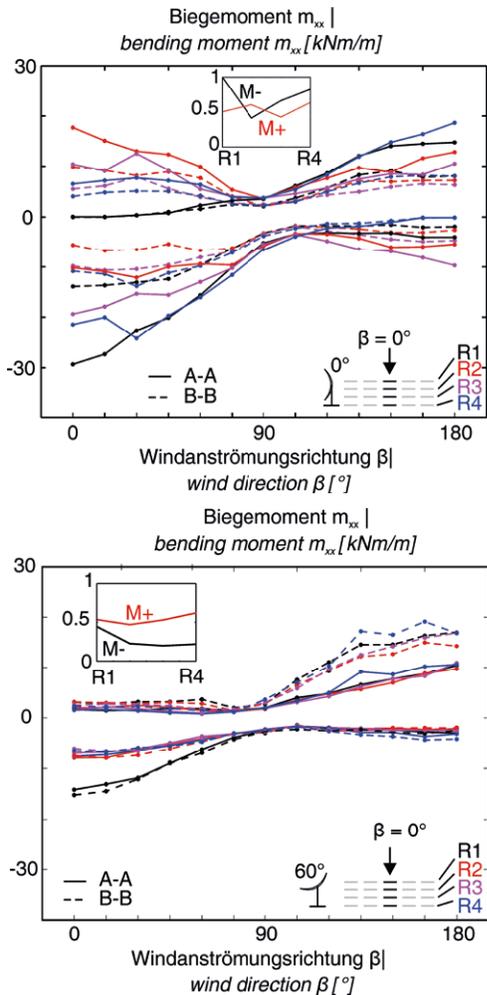


Bild 10: Maximale Querbiegemomente m_{xx} der Reihen R1–4, Anstellwinkel $\varphi = 0^\circ$ und 60° | Fig. 10: Maximum bending moment m_{xx} about longitudinal axis for a pitch angle of 0° and 60° in rows 1 to 4

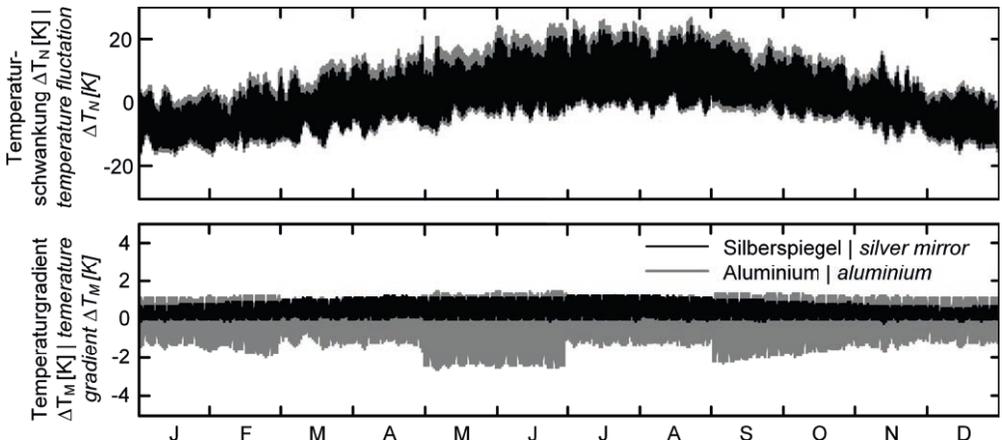


Bild 11: Numerisch simulierte Temperaturbeanspruchungen in der Parabolschale | Fig. 11: Numerically simulated temperature constraints in collector module's cross-section

wertet. Bild 11 zeigt die Ergebnisse für ein Jahr mit dem Ansatz eines Reflektors als Silber- oder Aluminiumspiegel. Eine ausführliche Herleitung ist in [12] gegeben. Daraus resultiert ein konservativer, einhüllender Lastansatz mit einer konstanten Temperaturschwankung von $\Delta T_N = \pm 30$ K und einem linearen Temperaturgradienten von $\Delta T_M = \pm 5$ K, welche aufgrund fehlender Korrelation zusätzlich in Anlehnung an [33] gewichtet werden.

6.3 Zeitabhängige Verformungen (RUB)

Initiale Vorverformungen sollen ungewollte herstellungsbedingte Initialabweichungen zur idealen Parabelform berücksichtigen. Diese sind als Fluktuation eines homogenen, isotropen Zufallsfeldes [34] abbildbar, welche mithilfe einer Autokovarianzfunktion über diskrete Punkte der Parabelöffnungsweite korreliert und so eingestellt wurden, dass sie, nach praxisüblichen Anforderungen an Tübbinge [35] hauptsächlich im Bereich von $\pm 0,5$ mm über eine Einflusslänge von 0,5 m streuen [24].

Untersuchungen zu den Auswirkungen von zeitabhängigen Kriech- und Schwindverformungen haben gezeigt, dass diese von untergeordneter Bedeutung für die Strahlenkonzentration sind. Schwinden bewirkt eine geringe, kontinuierliche Stauchung des Parabelquerschnitts und kann durch Wärmebehandlung frühzeitig zum Stoppen gebracht werden [36]. Aufgrund der

heat conduction based on an approach of temperature distributions on bridge structures [31], numerically discretized and implemented via explicit time integration in the environment of a spreadsheet [32]. Using the climatic boundary conditions for a typical location of parabolic trough power plants, the temperature constraints in a 5 cm thick shell was simulated and determined to a constant temperature fluctuation ΔT_N and a linear temperature gradient ΔT_M . Fig. 11 shows the results for one year with the approach of a reflector as a silver or aluminium mirror. A detailed derivation is given in [12]. This results in a conservative, enveloping temperature approach with a constant fluctuation of $\Delta T_N = \pm 30$ K and a linear gradient of $\Delta T_M = \pm 5$ K, which are additionally weighted according to [33] due to a lack of correlation.

6.3 Time-dependent deformations (RUB)

Initial pre-deformations consider unintended initial deviations from the ideal parabolic shape due to the manufacturing process. They are generated as fluctuation of a homogeneous, isotropic random field [34], which is correlated by means of an auto-covariance function via discrete points of the parabola aperture width and adjusted in such a way that they mainly scatter in the range of ± 0.5 mm over an influence length of 0.5 m [24], according to the usual requirements for tunnel lining segments [35].

Sonnennachführung stellen sich veränderliche Lastzustände aus Eigengewicht ein, die sich gegenseitig aufheben und daher kaum Kriechverformungen hervorrufen. In der Theorie können Kriechprozesse so rechnerisch vollständig ausgeschaltet werden. Eine ausführliche Darstellung der Modellansätze für die zeitlichen Verformungen [37], speziell von Parabolschalen aus Beton, ist in [22], [24] gegeben.

7 Optimierungsstrategien (RUB)

Die entwickelten Optimierungsstrategien beinhalten bewusst mehrere Ebenen. Ausgewählte Elemente waren:

Konzeptebene:

- Bestimmung von geometrischen Randbedingungen wie Aperturweite, Fokallänge, Modulänge, Absorberrohrbefestigung etc.
- Festlegung von Lagerungspunkten, Drehpunkt, Antriebstechnik etc.
- Anordnung von Sekundärelementen wie Zugbändern, Aussteifungen, Seitenschotte etc.

Strukturebene:

- Entwicklung einer Schalenstruktur mit minimalem Volumen und hoher Steifigkeit
- Bestimmung von minimalen Wandstärken, Querschnittsverlauf etc.
- Ableitung von minimalen Querschnitten und optimierter Lage der Sekundärelemente

Detailebene:

- Ableitung von Lösungen zur punktuellen Lasteinleitung
- Konzepte zum Anschluss der Sekundärelemente (z. B. Zugbänder als Durchspannung mit Endverankerung)
- Entwicklung von Elementen zur Auflagerung bzgl. der Sonnennachführung: Ausbildung von Seitenschotten, Abrollsicheln, Abrollhügel, Zahnräder etc.

Die Optimierungsstrategien berücksichtigen die zuvor beschriebenen spezifischen Einwirkungen in geeigneter Kombination und werden durch parallel verlaufende fertigungstechnische

Investigations of the effects of time-dependent creep and shrinkage deformations have shown that they are of secondary importance for the solar ray concentration. Shrinkage causes a slight, continuous swell of the parabolic cross-section and can be stopped early by heat treatment [36]. Due to the tracking of the sun, variable load conditions arise from dead load, which partially neutralise each other and therefore cause hardly any creep deformations. Thereby, creep processes can be completely eliminated theoretically. A detailed description of the model approaches for time-related deformations [37], especially for parabolic shells made of concrete, is given in [22], [24].

7 Optimisation strategies (RUB)

The developed optimization strategies contain several levels. Selected items are:

Concept level:

- Determination of geometric boundary conditions such as aperture width, focal length, module length, mounting of absorber tubes, etc.
- Definition of bearing positions, pivot points, drive technology, etc.
- Arrangement of secondary elements such as tension ties, stiffeners, bulkheads, etc.

Structure level:

- Development of a shell structure with minimal volume and high stiffness
- Determination of minimum wall thicknesses, cross-sectional shapes, etc.
- Derivation of minimal cross-sections and optimized arrangement of secondary elements

Detail level:

- Derivation of structural solutions for pointwise loadings
- Concepts for connecting the secondary elements (e.g. tension ties with anchors)
- Development of supporting elements with respect to the sun tracking: design of bulkheads, roll-off sickles, roll-off mounds, gear wheels etc.

(Schalungstechnik, Bewehrungstechnik etc.) sowie betontechnologische Untersuchungen (Betonzrezeptur, Verarbeitbarkeit etc.) begleitet.

7.1 Strukturoptimierung

Im entwickelten Verfahren zur Strukturoptimierung mit anfänglich gradientenbasierten Methoden ist die multikriterielle Problemstellung – ein sowohl leichtgewichtiges auch verformungsarmes Tragwerk – aufgelöst worden, indem eine Minimierung des Volumens die alleinige Zielfunktion beschreibt und die erforderliche Systemsteifigkeit innerhalb einer nachgeschalteten Genauigkeitsprüfung der Schaleninnenfläche sichergestellt wird [24]. Verschiedene nacheinander durchlaufene Beanspruchungsszenarien in Abhängigkeit der Kollektorauslenkung beschränken den Optimierungsprozess. Restriktionen sind im Wesentlichen die Beschränkung der Hauptspannungen auf die zentrische Zugfestigkeit des Betons. Kollektorauslenkungen von 45° und 60° sowie, eher untergeordnet, 0° sind maßgeblich für den Optimierungszyklus und führen in Kombination mit dem Eigengewicht zu ungünstigen Verformungen der Schaleninnenfläche sowohl für kleinformatige als auch für großformatige Kollektormodule.

7.1.1 Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse mit nachgeschalteter Formoptimierung

Um dem Anspruch einer leichtgewichtigen und gleichzeitig verformungsarmen Tragstruktur gerecht zu werden, wurden im Formfindungsprozess für Parabolschalen nach geometrischem Vorbild des *EuroTroughs* Schalentragwerke mit äußeren, linienartigen Versteifungen – auch im Hinblick auf die Herstellung – entwickelt, da das Volumen maßgeblich durch die Schalendicke definiert ist und durch eine rippenartige Verstärkung die Eigenlast reduziert werden kann, ohne verhältnismäßig hohe Steifigkeitsverluste zu erhalten. Durch die äußeren Versteifungen wurden somit auch die Freiwerte bzw. Optimierungsvariablen erhöht, sodass ein gradientenbasierter Optimierungsprozess um eine Voroptimierung auf Basis des „Metamodells Optimaler Prognosefähigkeit“ (MOP)

The optimisation strategies consider the specific actions described above in a suitable combination and are complemented by parallel manufacturing (formwork technology, reinforcement technology, etc.) and concrete technology investigations (concrete mixture, workability, etc.).

7.1 Structural optimisation

Within the developed methods for structural optimization with initially gradient based methods, the multi-criterial problem – both a lightweight and a low-deformation structure – has been solved by minimizing the volume, describing the objective function and ensuring the required system stiffness by means of a subsequent accuracy analysis of the inner shell surface [24]. Various load scenarios according to the collector deflection constrain the optimization process. Restrictions are essentially the limitation of the main stresses to the axial tensile strength of the concrete. Collector deflections of 45° and 60° and, rather negligible, 0° are significant for the optimization cycle and, in combination with the dead weight, lead to decisive deformations of the inner shell surface for both small-scale and large-scale collector modules.

7.1.1 Variance-based sensitivity analysis with subsequent shape optimisation

In order to fulfil the demands for a lightweight and at the same time low-deformation structure, within the form finding process parabolic shells according to the geometry of the *EuroTrough* were developed with linear ribs at the shells backside – also with regard to manufacturing – since the volume is defined mainly by the shell thickness. Thus, the dead load can be reduced by outer ribs without losing significant rigidity. Due to the additional ribs, the optimization variables increased, so that a gradient based optimisation process was extended by a pre-optimisation based on the ‘Metamodel of Optimal Prognosis’ (MOP) [38]. Using stochastic samplings, e.g. *Latin Hypercube*, the responses of the structure are approximated using meta-models. In addition, a variance-based sen-

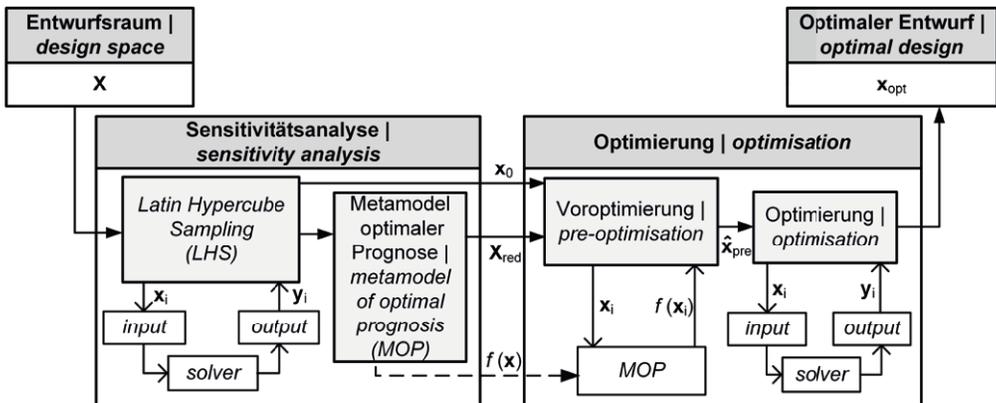


Bild 12: Ablaufdiagramm des sensitivitätsbasierten Optimierungsprozesses | Fig. 12: Sensitivity based optimisation process

[38] erweitert wurde. Mittels stochastischer Samplingverfahren, z. B. *Latin Hypercube Sampling*, werden dazu die Systemantworten des Tragwerks mithilfe von Approximationsfunktionen angenähert. Zusätzlich werden durch eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse, welche die Prognosefähigkeit einzelner Freiwerte auf die Systemantworten bewertet, wesentliche Freiwerte identifiziert und somit der Freiwerteraum eingrenzt. Auf Ebene der analytischen Approximationsmodelle erfolgt dann eine erste Voroptimierung. Das so generierte analytische Optimum dient dann als Startwert für den rechnerisch aufwändigeren Optimierungsprozess auf numerischer Ebene (Bild 12). Analysen unterschiedlicher Aussteifungskonzepte, welche stets eine kreuzende Diagonalaussteifung auf Schalenrückseite als Primärverstärkung besitzen, zeigen, dass eine Massenreduktion von 20–30 % im Verhältnis zum vollwandigen Schalenmodell bei gleichzeitiger Einhaltung der geforderten Oberflächengenauigkeiten möglich ist [12].

7.1.2 Innere Strukturfindung

Bei großformatigen Kollektormodulen wird eine erhöhte Querstruktursteifigkeit durch eine Vergrößerung des inneren Hebelarms von den Strukturängsrändern zum Scheitel erzielt. Unter Einhaltung der zentrischen Zugfestigkeit des Betons muss die Unterseite des Querschnitts dazu in ihrer Höhe angepasst werden. Simultan ist

sensitivity analysis, which evaluates the prognosis ability of single variables in relation to the responses, identifies essential variables and thus reduces the design space. At the reduced level of the analytical metamodels, an initial pre-optimization takes place. The analytical optimum generated in this way then serves as the starting value for the computationally more complex optimization process on the numerical level (Fig. 12). Analyses of different rib patterns, which always have diagonally crossing ribs on the backside of the shell as primary stiffener, show that a mass reduction of 20–30% in relation to the full-walled shell model is possible while simultaneously maintaining the required surface accuracy [12].

7.1.2 Inner form finding

In the case of large-scale collector modules, increased transverse rigidity is achieved by enlarging the inner lever arm from the longitudinal edges of the structure to the vertex. While maintaining the axial tensile strength of the concrete, the height of the backside of the cross-section must be adjusted for this purpose. Simultaneously, the volume must be reduced so that the full cross-section is transformed into a hollow cross-section. Embedded void formers in the neutral level of the cross-section enable to save dead weight and thus achieve larger spans with the same cross-section height. This principle was adopted for large-scale collector modules

das Volumen zu reduzieren, sodass der Vollquerschnitt in einen Hohlquerschnitt aufgelöst wird. Eingebettete Hohlkörper in der Neutralebene des Querschnitts ermöglichen es, Eigengewicht einzusparen und somit größere Spannweiten bei gleicher Querschnittshöhe zu realisieren. Für großformatige Kollektormodule wurde dieses Prinzip aufgegriffen und eine Strategie der inneren Strukturfindung entwickelt, welche neben der Ermittlung der Volumenreduktion auch effektive Biege-, Membran und Schubsteifigkeitskennwerte für beliebige Hohlkörpergrößen und -formen bereitstellt, die als homogenisierte Schicht in numerischen Analysen und der Strukturoptimierung der Schale berücksichtigt werden können (Bild 13) [19], [39]–[41].

Zur Ermittlung effektiver Steifigkeitskennwerte wird partiell ein Volumenelement mit Hohlkörpern extrahiert und aufgrund der periodischen Anordnung der Hohlkörper eine repräsentative Einzelzelle definiert, deren elastische Eigenschaften auf die Gesamtstruktur projiziert werden können. Obwohl die Einzelzelle als dreidimensionale Struktur vorliegt, kann als ingenie-

and a strategy of inner form finding was developed which, in addition to determining volume reduction, also provides effective bending, membrane and shear stiffness parameters for any size and shape of void formers, which can be considered as a homogenized layer in numerical analyses and structural optimisation of the shell (Fig. 13) [19], [39]–[41].

To determine effective stiffness values, a volume element with void formers is partially extracted and, due to the periodic arrangement, a representative unit cell is defined whose elastic properties can be projected onto the overall structure. Although the unit cell represents a three-dimensional structure, it can be described as a combination of two-dimensional single systems, which represent stiffnesses of a slab, a plate or a beam (longitudinal and transverse ribs) with an effective, hollow core specific width b_{eff} , depending on the definition. Shear deformations remain unconsidered due to simplification (Kirchhoff theory). For the reduced unit cell, homogeneous, isotropic upper and lower cover layers as well as voids are de-

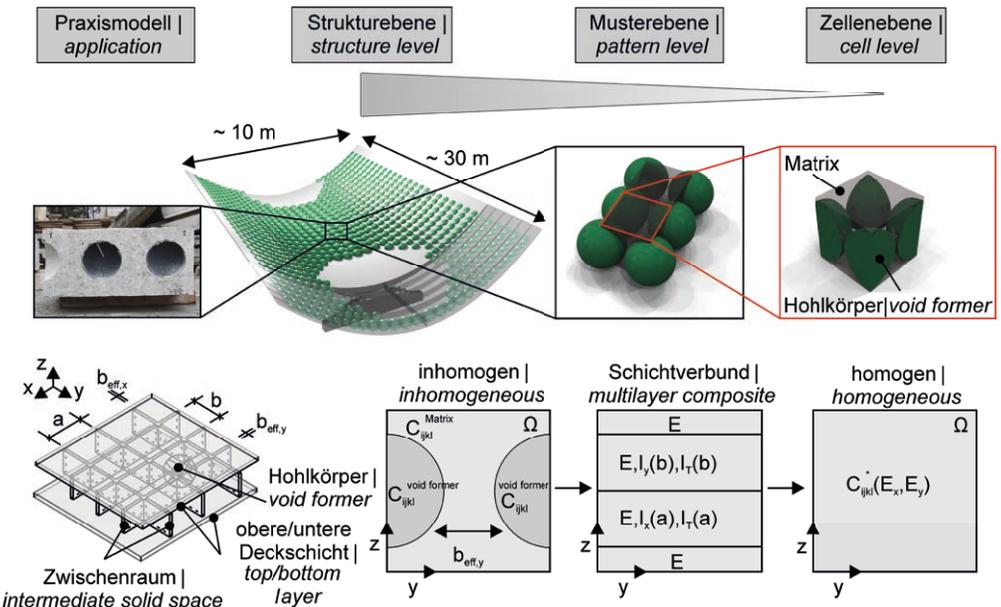


Bild 13: Konzept zur Ermittlung effektiver Steifigkeitskennwerte (oben) und Strategie zur Umsetzung in numerischen Modellen (unten) | Fig. 13: Strategy to determine effective stiffness values for embedded void formers (top) and to implement in numerical models (bottom)

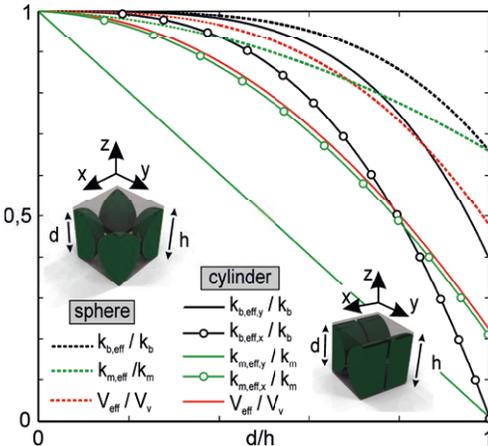
eurwissenschaftliche Näherung die Struktur als ein Verbund von zweidimensionalen Einzelsystemen beschrieben werden, die je nach Definition Steifigkeiten einer Scheibe oder einer Platte bzw. eines Balkens (Längs- und Querrippen) mit effektiver, hohlkörperspezifischer Breite b_{eff} repräsentieren. Schubdeformationen bleiben vereinfachend unberücksichtigt (Kirchhoff-Theorie). Für die reduzierte Einzelzelle werden als Einzelsysteme homogene, isotrope obere und untere Deckschichten sowie Zwischenräume in der Hohlkörperebene als längs- und querorientierte Parallelsteifenscharen mit verschmierter Steifigkeit über die Achsabstände a bzw. b definiert (Bild 13, unten). Die Gesamtsteifigkeit des Verbunds ergibt sich dann aus der Summe von Scheiben- und Platten- bzw. Balkensteifigkeiten der Einzelsysteme. Aufgrund des symmetrischen Strukturaufbaus des Verbunds zu zwei rechtwinkligen Normalebene (Parallelsteifenscharen) gilt das elastische Verhalten der Gesamtstruktur als orthotrop. Bild 14 zeigt exemplarisch den Verlauf der normierten Biege- und Membransteifigkeit für den Einschluss einer Kugel bzw. eines Zylinders sowie die Anteile der Einzelsysteme an der Gesamtbiegesteifigkeit.

Bis zu einer Hohlkörperhöhe von ca. 40 % der Einzelzelle sind für beide Hohlkörpergeome-

nien als longitudinal und transversely orientated parallel ribs with smeared stiffness over the distances a and b (Fig. 13, bottom). The total stiffness of the composite then results from the sum of the slab and plate or beam stiffnesses of the individual systems. Due to the symmetrical structure of the composite to two orthogonal normal planes (parallel stiffeners), the elastic behaviour of the overall structure is considered orthotropic. Fig. 14 shows an example of the course of the standardised bending and membrane stiffness for embedded spheres or cylinders as well as the components of the individual stiffness to the total bending stiffness.

Up to a void former height of approx. 40% of the unit cell, hardly any significant bending stiffness losses in the longitudinal direction can be noted for both geometries. Maximum volume reductions are generally achieved with cylinders as void formers. With a higher d/h ratio, only the transverse direction of the unit cell with embedded cylinders loses comparatively more rigidity, so that the relative decrease in rigidity is greater than the volume reduction. From a d/h -ratio of ~ 0.85 , the rigidity of the overall system is mainly determined by the moment of inertia of the parallel strip (Fig. 14, right). In general, the relative decrease of the stiffness values is less than

normierte effektive Steifigkeiten einer Einheitszelle | unit cell's norm. eff. stiffness values



Anteile an Gesamtbiegesteifigkeit (Kugel) | total bending stiffness components (sphere)

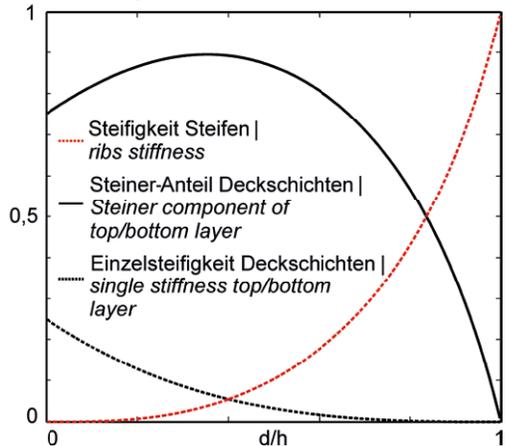


Bild 14: Normierte effektive Steifigkeitskennwerte für Biege- und Membransteifigkeit mit kugelförmigen und zylindrischen Hohlkörpern (links) sowie Verlauf der Anteile an Gesamtsteifigkeit (rechts) | **Fig. 14:** Normalised effective stiffness values for bending and axial stiffness of a unit cell with various void formers (left) and development of each layer of the multilayer composite (right)

trien erwartungsgemäß kaum nennenswerte Biegesteifigkeitsverluste in Längsrichtung zu vermerken. Größte Volumenreduktionen werden generell mit Zylindern als Hohlkörper erzielt. Mit höherem d/h -Verhältnis verliert lediglich die Querrichtung der Einzelzelle mit Einschluss eines Zylinders vergleichsweise stärker an Steifigkeit, sodass die relative Abnahme der Steifigkeit größer ist als die Volumenreduktion. Ab einem d/h -Verhältnis von $\sim 0,85$ wird die Steifigkeit des Gesamtsystems überwiegend aus dem Eigenträgheitsmoment der Parallelsteifenschar geprägt (Bild 14, rechts). Für die Kugel gilt allgemein, dass die relative Abnahme der Steifigkeitskennwerte geringer ist als die Volumenreduktion, sodass im Vergleich zu einem Vollquerschnitt geringere elastische Verformungen resultieren.

7.1.3 Topologieoptimierung mit modifiziertem SIMP-Ansatz für mittensymmetrische steifigkeitsorientierte Rippenverstärkung

Zur Identifizierung der Anordnung möglicher Hohlkörperverteilungen in der Schale bzw. von Verstärkungsrippen, welche dem Kraftfluss innerhalb des Bauteils gerecht wird, bietet sich die topologische Optimierung an [42]. Über die Steuerung der Verteilung einer Pseudodichte ρ im vorgegebenen Entwurfsraum lassen sich so Bereiche bestimmen in denen Material vorhanden sein muss bzw. keines erforderlich ist, bei gleichzeitiger Maximierung der Struktursteifigkeit (Minimierung der Nachgiebigkeit). Kommerzielle Programmsysteme bieten nur wenige Gestaltungsparameter für die Beeinflussung der topologischen Optimierung von Strukturen. Neben der Vorgabe einer z. B. gewünschten Volumenreduktion stehen i. d. R. nur ausgewählte finite Elemente zur Verfügung, um eine Optimierung durchzuführen. Eigene Lösungsalgorithmen unter Berücksichtigung bereits vorhandener Basismodule [43] konnten innerhalb des Programmsystems *MATLAB* integriert werden. Aus der klassischen Betrachtung des inneren Aufbaus einer ebenen Struktur wird für Flächentragwerke eine Optimierung in Dickenrichtung, da die Steifigkeit nicht mehr ausschließlich vom E-Modul, sondern auch

the volume reduction due to the sphere, so that lower elastic deformations result in comparison to a full cross-section.

7.1.3 Topology optimisation with modified SIMP approach for symmetric rigidity-oriented ribs

Topological optimisation provides a method for identifying the arrangement of possible void former distributions in the shell or of ribs, which follow the flow of forces within the structure [42]. By steering the distribution of a pseudo density ρ in the predefined design space, areas can be determined in which material must be present or is not required, while maximising the structural stiffness (minimising the compliance) simultaneously. Commercial program systems offer only a few design parameters for controlling the topological optimization of structures. Besides the specification of a desired volume reduction, for example, only subset finite elements are usually suitable for an optimization task. Our own solution algorithms that consider already given basic modules [43] could be integrated within the program system *MATLAB*. From the conventional view of a planar structure, an optimisation in thickness direction is developed for shell structures, since the stiffness no longer depends solely on the modulus of elasticity, but also on the wall thickness t . Thus, the resulting density distribution corresponds to a material distribution over the wall thickness. For shell structures, in addition to the general density distribution, the structural composition of the density on the basis of its stiffness components is also interesting for further analyses. In order to analyse shell structures with respect to the composition of thickness direction, a new approach was developed which is based on already known 4-noded shell elements with reduced integration and superposes bending (k_b), membrane (k_m) and shear stiffness (k_s) components (Mindlin-Reissner theory [44]). In the optimization process, the individual stiffness components are separately described by modifying the objective function, here the minimization of the system compliance, and sensitivities. Thus, each stiffness

von der Wandstärke t abhängt. Die resultierende Dichteverteilung entspricht somit einer Materialverteilung über die Wandstärke. Bei Schalenstrukturen ist neben der allgemeinen Dichteverteilung auch die strukturelle Zusammensetzung der Dichte anhand ihrer Steifigkeitsanteile für weitergehende Analysen interessant. Um Schalenstrukturen auch hinsichtlich ihres Aufbaus in Dickenrichtung analysieren zu können, wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der auf Basis bekannter 4-knotiger Schalenelemente mit reduzierter Integration besteht und Biege- (k_b), Membran- (k_m) und Schubsteifigkeitsanteile (k_s) überlagert (Mindlin-Reissner-Theorie [44]). Im Optimierungsprozess werden die einzelnen Steifigkeitsanteile unter Modifizierung von Zielfunktion, hier die Minimierung der Systemnachgiebigkeit, und Sensitivitäten aufgelöst formuliert. Jeder Steifigkeitsanteil erhält somit eigene Entwurfsvariablen mit zugehörigen exponentiellen Strafparametern λ , sodass sich die Elementsteifigkeitsmatrix k_i ergibt zu:

$$k_i = \rho_0^\lambda \left[(1 - \rho_b)^\lambda \cdot k_{ib} + \rho_b^\lambda \cdot (1 - \rho_m)^\lambda \cdot k_{im} + \rho_b^\lambda \cdot \rho_m^\lambda \cdot k_{is} \right] \quad (2)$$

wobei i die Elementnummer ist. Der Parameter ρ_0 entspricht der klassischen Entwurfsvariablen, die für die grundsätzliche Dichteverteilung im Entwurfsraum zuständig ist. Anteilmäßig wird über die Variation der zweiten Entwurfsvariablen ρ_b der Einfluss der Biegesteifigkeitskomponente aufgezeigt, die Anteile der Membran- und Schubsteifigkeit ergeben sich analog. Bild 15 zeigt dazu die Dichteverteilung des klassischen SIMP-Ansatzes (oben links) [42] und der hier entwickelten, auf Schalensteifigkeiten basierten Formulierung (oben rechts) unter gleichen Inputparametern [45]. Der konventionelle SIMP-Ansatz liefert überwiegend schwarz-weiße 1-0-Designs, der modifizierte bildet ebenfalls deutliche Hauptrippen aus, allerdings in Kombination mit einem großen Anteil an Zwischendichten (grau). Eine Aufteilung in Biege-, Membran- und Schubsteifigkeit (Bild 15, unten) zeigt, dass Hauptrippen sich überwiegend aus Membransteifigkeits- mit wenigen Biegesteifigkeitsanteilen entwickeln. Zwischendichten sind hauptsächlich der Biegesteifigkeit zuzuordnen, die als gering ausgeprägte Sekun-

component receives its own design variables with associated exponential penalty factor λ , so that the resulting element stiffness matrix k_i is:

$$k_i = \rho_0^\lambda \left[(1 - \rho_b)^\lambda \cdot k_{ib} + \rho_b^\lambda \cdot (1 - \rho_m)^\lambda \cdot k_{im} + \rho_b^\lambda \cdot \rho_m^\lambda \cdot k_{is} \right] \quad (2)$$

where i is the number of elements. The parameter ρ_0 corresponds to the classic design variable, which steers the basic density distribution within the design space. The influence of the bending stiffness component is shown proportionally by the variation of the second design variable ρ_b , the ratios of the membrane stiffness and shear stiffness result analogously. Fig. 15 shows the density distribution of the classical SIMP approach (top left) [42] and the distribution pattern based on shell stiffness formulation developed here (top right) under equal input parameters [45]. The conventional SIMP approach mainly delivers black and white 1-0 designs, the modified one also forms distinct main ribs, but combined with a large amount of intermediate densities (grey). A classification into bending, membrane and shear stiffness (Fig. 15, bottom) shows that the main ribs arise primarily from membrane stiffness with a low amount of bending stiffness. Intermediate densities are mainly due to bending stiffness, which would be applied as secondary ribs. Shear stiffness components are of minor importance and occur only in concentrated form at the support. With this formulation, stiffness-orientated ribs can now be designed inside the cross-section. By specific modification of the boundary conditions and penalization of stiffness components, not only shell structures but also slab or plate structures can be optimized, so that this method can be used in many ways.

7.1.4 Distribution of void formers based on graded densities

For a stiffness-oriented distribution of void formers within the neutral level of the cross-section of shell structures, the effective stiffness values derived from section 7.1.2 were specified for different void sizes as a function of volume reduction. The density/stiffness ratio can no longer be controlled by a freely selectable expo-

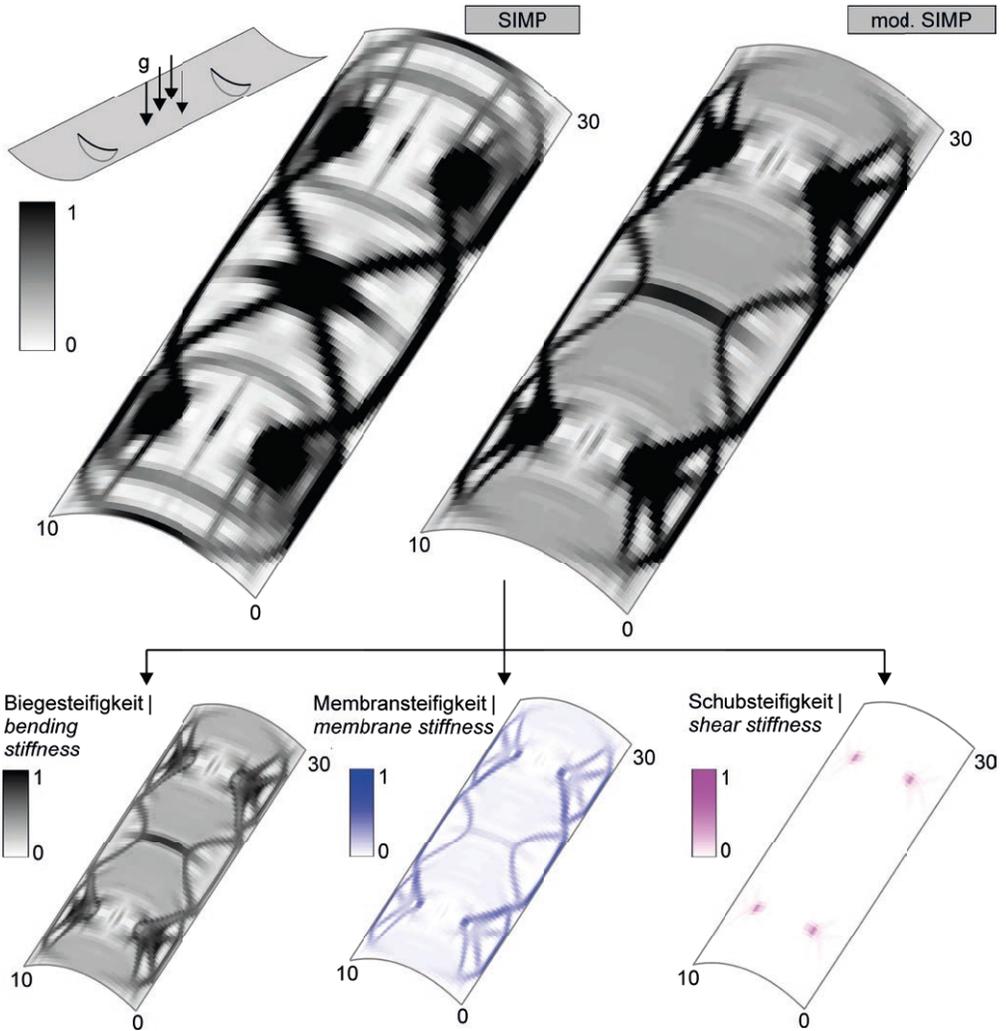


Bild 15: Dichtelayouts mit klassischem SIMP-Ansatz (oben links) und modifizierter SIMP-Formulierung (oben rechts) und Aufteilung in Steifigkeitsanteile (unten) | **Fig. 15:** Conventional topology optimisation SIMP approach (top left) and modified SIMP approach (top right) separated in stiffness components (bottom)

därrippen Anwendung finden würden. Schubsteifigkeitsanteile sind untergeordnet und treten nur konzentriert am Auflager auf. Mit dieser Formulierung können nun steifigkeitsaffin Verstärkungsrippen im inneren des Querschnitts konstruiert werden. Durch gezielte Anpassung der Randbedingungen und Bestrafung von Steifigkeitsanteilen können neben Schalenstrukturen auch Scheiben- oder Plattenstrukturen optimiert werden, sodass diese Methode variabel und vielfältig einsetzbar ist.

nent in the formulation, but is described explicitly and functionally. Thus, bending, membrane and shear stiffnesses are not only actually coupled, but also combined within the optimization algorithm by means of the design variable. The predetermination of the physical dependencies leads to a limitation of the optimization problem, so that oscillating variations of the density per iteration step, which could occur with free density/stiffness ratios per stiffness component (section 7.1.3), are significantly reduced,

7.1.4 Hohlkörperverteilung aus gradierten Dichten

Für eine steifigkeitsorientierte Verteilung von Hohlkörpern innerhalb der Neutralebene des Querschnitts von Schalenstrukturen wurden die abgeleiteten effektiven Steifigkeitskennwerte aus Abschnitt 7.1.2 für verschiedene Hohlkörpergrößen in Abhängigkeit der Volumenreduktion formuliert. Das Dichte-Steifigkeits-Verhältnis ist nun nicht mehr durch einen frei wählbaren Exponenten in der Formulierung steuerbar, sondern ist explizit funktional beschrieben. So sind Biege-, Membran- und Schubsteifigkeiten nicht nur real verknüpft, sondern auch innerhalb des Optimierungsalgorithmus über die Entwurfsvariable gekoppelt. Die Vorgabe der physikalischen Abhängigkeiten führt zu einer Eingrenzung des Optimierungsproblems, sodass sich oszillierende Änderungen der Dichte je Iterationsschritt, die sich bei freien Dichte-Steifigkeits-Verhältnissen je Steifigkeitsanteil einstellen konnten (Abschnitt 7.1.3), deutlich abschwächen, sodass finale Dichteverteilungen frühzeitig entstehen. Resultierende Dichteverteilungen sind für eine Hohlkörperverteilung aufgrund des feinen – rechnerisch erforderlichen – FE-Netzes zu detailliert aufgelöst, da die Größe eines Hohlkörpers mehrere Elemente umfasst. In einer nachgeschalteten Post-Processing-Analyse wird unter Mittelung angrenzender Elemente, repräsentativ für einzelne Hohlkörper oder in Gruppenanordnung, eine wesentliche gröbere Dichteverteilung generiert, mit der über das Dichte-Steifigkeits-Verhältnis charakteristische Hohlkörpergrößen abgeleitet werden können. Bild 16 zeigt das Schema von der funktionalen Beschreibung diskreter Steifigkeitswerte (links) über eine generierte Dichteverteilung (mittig) bis zu einer abgeleiteten Hohlkörperverteilung (rechts). Die ausgeprägte Farbabstufung zwischen 0 und 1 führt dabei zu einer deutlicheren Identifikation von Zwischendichten. Der Transfer zwischen Dichte- und Hohlkörperverteilung gelingt über eine vorherige Definition von Hohlkörpergröße und -anordnung z. B. als Solist oder in Gruppe, hier exemplarisch für eine Gruppe von 2×2 Hohlkörpern gleicher Größe und der Mittelung der Dichten

so that final density distributions occur early. Resulting density distributions are too detailed for a distribution of void formers due to the fine – computationally required – FE mesh, since the size of a void comprises several elements. In a downstream post-processing analysis, a considerably more coarse density distribution is generated by averaging nearby elements, representing individual void formers or a group arrangement, in order to derive characteristic void sizes by means of the density/stiffness ratio. Fig. 16 shows the scheme of the functional description of discrete stiffness values (left), a generated density distribution (centre) and a derived void former distribution (right). The distinct colour gradation between 0 and 1 leads to a distinct identification of intermediate densities. The transfer from density to void former distributions is achieved by a previous definition of void former size and arrangement e.g. solo or in a group, here exemplarily for a group of 2×2 voids of the same size and the averaging of the densities of the elements enclosed by this defined size. Strong concentrations of high density values (red) at the supports lead to no or only small void former sizes, low density values (blue) to maximum sizes and intermediate sizes in transition areas. The presented method can be transferred to any shape of void formers and structures (plate, slab) and a stiffness-oriented distribution of void formers can be derived in a subsequent analysis.

7.2 Robustness (RUB)

In robustness analyses, the uncertainty of geometric and/or material parameters is mostly considered. Variable load scenarios are often ignored or less important. During the complex wind tunnel tests, a representative database was established which allows the use of these data for robustness analyses in order to consider variations or uncertainty of measured wind pressures to determine the influence on the structural response. Analogously, an approach for a robust topological density distribution under several load cases was implemented for the optimization concepts of inner form finding.

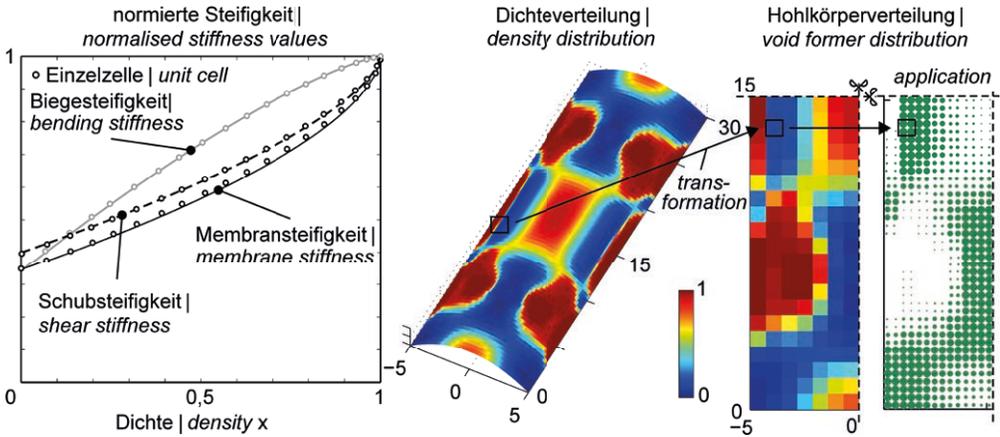


Bild 16: Elemente zur steifigkeitsorientierten Hohlkörperverteilung: normierte Steifigkeiten in Abhängigkeit der Dichte (links), generierte Dichteverteilung (mittig) und abgeleitete Hohlkörperverteilung (rechts) | **Fig. 16:** Elements to distribute void formers in structures: normalised effective stiffness values from a unit cell analysis (left), optimised density distribution (centre) and void former distribution (right)

der von dieser definierten Größe eingeschlossenen Elemente. Starke Konzentrationen hoher Dichtewerte (rot) an den Auflagern führen zu keinen bzw. nur geringen Hohlkörpergrößen, geringe Dichtewerte (blau) zur Maximalgröße und Zwischengrößen in Übergangsbereichen. Die vorgestellte Methode kann auf beliebige Formen von Hohlkörpern und Strukturen (Platte, Scheibe) übertragen und in einer Nachlaufanalyse eine steifigkeitsorientierte Hohlkörperverteilung abgeleitet werden.

7.2 Robustheit (RUB)

In Robustheitsanalysen werden vorwiegend die Unschärfen geometrischer und/oder materieller Parameter eingebunden. Veränderliche Beanspruchungen bleiben häufig unberücksichtigt oder sind untergeordnet. In den Windkanaluntersuchungen wurde eine repräsentative Datenbasis aufgebaut, die es erlaubt, experimentelle Daten für Robustheitsanalysen zu verwenden, um gezielt Variationen bzw. Unschärfen von gemessenen Winddrücken zu berücksichtigen, um den Einfluss auf die Strukturantwort zu erfassen. Analog wurde für die Optimierung der inneren Strukturfindung ein Ansatz zur robusten Generierung topologischer Dichteverteilungen bei mehreren Lastfällen implementiert.

7.2.1 Stochastic approaches from experimentally determined wind tunnel test data

The 78%-quantiles derived in section 6.1 for the determination of equivalent wind pressure distributions on parabolic trough collector modules are not correlated between the individual measuring taps over the parabolic shell, so that extreme values do not occur simultaneously. Rather, combinations of values of the assumed distributions per measuring point can result. An extension of the previous numerical analysis offers a simulation of the value spectrum of these distribution functions. Using *Latin Hypercube Sampling* (LHS), equally distributed random values between 0 and 1 were generated which represent discrete points of a Gumbel distribution function $F(x)$ derived from measured values (Fig. 17). The transfer into a density distribution $f(x)$ provides an accuracy criterion of the represented function by calculating characteristic parameters such as mean value, standard deviation, modal value and dispersion. Convergence studies have shown that at least a number of 80 samplings (simulations) should be used to adequately characterise the Gumbel distribution with a deviation of the parameters of $\leq 3\%$. Thus, independently for each measuring point stochastic random numbers are determined, which serve as input for the numerical analysis. Fig. 18 shows the combinations of pressure

7.2.1 Stochastische Ansätze aus experimentell ermittelten Windkanalversuchsdaten

Die in Abschnitt 6.1 abgeleiteten 78%-Fraktilewerte zur Ermittlung äquivalenter Winddruckverteilungen für Parabolrinnen-Kollektormodule sind zwischen den einzelnen Messstellen über die Parabolchale nicht korreliert, sodass Extremwerte nicht simultan auftreten. Vielmehr können Kombinationen von Werten der zugrunde gelegten Verteilungen je Messstelle auftreten. Eine Erweiterung der bisherigen numerischen Analyse bietet eine Simulation des Wertespektrums dieser Verteilungsfunktionen. Mittels *Latin Hypercube Sampling* (LHS) wurden gleich verteilte Zufallswerte zwischen 0 und 1 generiert, die diskrete Punkte einer aus Messwerten abgeleiteten Gumbel-Verteilungsfunktion $F(x)$ abbilden (Bild 17). Der Transfer in eine Dichteverteilung $f(x)$ liefert ein Maß über die Genauigkeit der abgebildeten Funktion durch Berechnung verteilungsbeschreibender Parameter wie z. B. Mittelwert, Standardabweichung, Modalwert und Dispersion. Konvergenzstudien ergaben, dass mindestens 80 Simulationen zur ausreichenden Beschreibung der Gumbel-Verteilung mit einer Abweichung der Parameter von $\leq 3\%$ anzusetzen sind. Unabhängig für jede Messstelle werden so stochastische Zufallszahlen als Input für die numerische Analyse ermittelt. Bild 18 zeigt die Kombinationen von Druckbeiwerten je Sampling (links) und exemplarisch die Streuung des normierten, maximal auftretenden negativen Querbiegemomentes m_{11} infolge Windlast für die Kollektorreihen 1 bis 4 bei Verwendung von 100 Samplings für einen Anstellwinkel von 0° . Die Normierung erfolgte auf den 78%-Fraktilewert der ersten Reihe (schwarze Linie), zusätzlich sind die Häufigkeitsverteilungen je Reihe angegeben. Maximale Querbiegemomente werden durch die Simulationen abgedeckt und umhüllen 78%-Fraktilewerte, sodass die Abbildung eines Windereignisses mit einer 50-jährigen Wiederkehrperiode eingehalten wird. Je Reihe bilden verschiedene Simulationen Maximalwerte ab (rote Linien), wobei 78%-Fraktilewerte durchgehend ca. $2/3$ der auftretenden Werte abdecken. Windverschattungseffekte zwischen den Reihen sind deutlich zu erkennen. Eine minimale Reduk-

coefficients per sampling (left) and exemplarily the variation of the standardised, maximum occurring negative transverse bending moment m_{11} due to wind load for the collector rows 1 to 4 using 100 samples for a pitch angle of 0° . The standardisation was based on the 78%-quantile of the first row (black line); additionally the frequency distributions per row are given. Maximum transverse bending moments are covered by the simulations and enclose 78%-quantiles so that the representation of a wind event with a 50-year return period is maintained. For each row, different simulations show maximum values (red lines), whereby 78%-quantiles permanently cover approx. $2/3$ of the occurring values. Shadowing effects between the rows are clearly visible. A minimum reduction of approx. 20% occurs in the fourth row, a maximum of approx. 55% in the second. There is a tendency for the effect from row 3 to row 4 to decrease, so that reductions smaller than 20% from row 5 will not be expected.

7.2.2 Robust density distribution designs

The method for stiffness-oriented density distribution developed in section 7.1.3 performed exemplarily for a constant area load. By implementing variable load cases as multi-objective optimization approach and the weighted sum compliance as objective function, variable load cases can be combined and a robust material distribution can be derived. Fig. 19 shows the material distributions with respect to the individual stiffness components using a surface load acting on the entire inner surface in combination with a one-sided surface load. A previously symmetrical material distribution (section 7.1.3) is replaced by an antisymmetric one. Material concentrations not only appear in the area of the supports but also at the more heavily loaded longitudinal edge, predominantly in the form of bending stiffness, which – in combination with the truss structure of membrane stiffness components asymmetrically formed to the longitudinal axis – produce a locally varying optimized load transfer. Thus, the influence of the one-sided surface load is considered in terms of stiffness. A combination

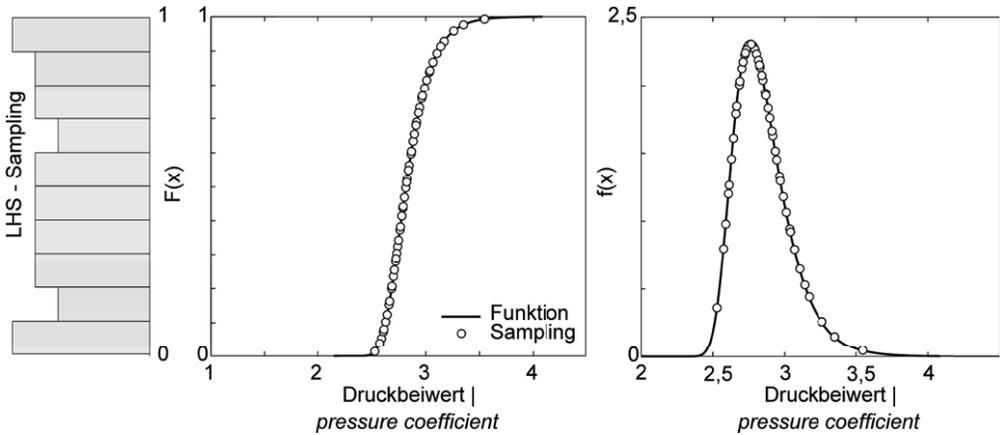


Bild 17: Latin Hypercube Sampling zur Abbildung diskreter Punkte der Gumbel-Verteilung | Fig. 17: Latin hypercube sampling mapping discrete values of the Gumbel distribution

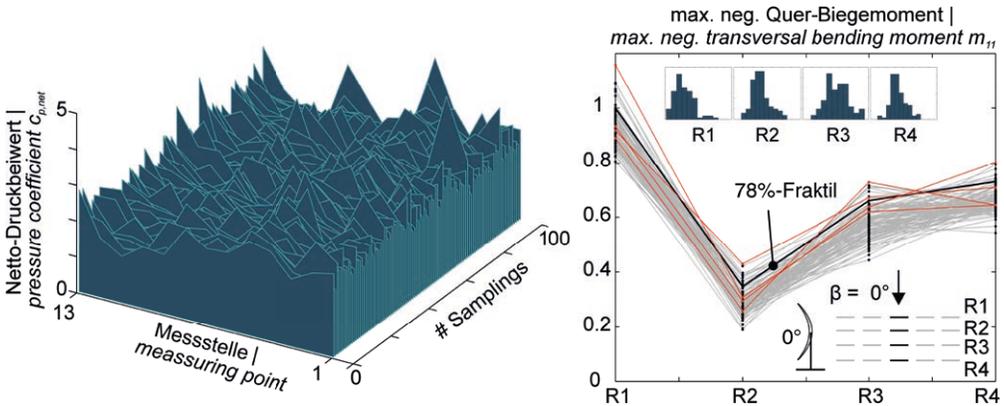


Bild 18: Zufallsbasierte Netto-Druckbeiwerte je Messstelle und Sampling (links) sowie Streuung des normierten, maximal negativen Biegemomentes m_{11} über die Reihen 1–4 eines Solarfeldes (rechts) | Fig. 18: Random based pressure coefficients for measuring points and sampling (left) and normalised maximum bending moment m_{11} about longitudinal axis for rows 1–4 in solar fields (right)

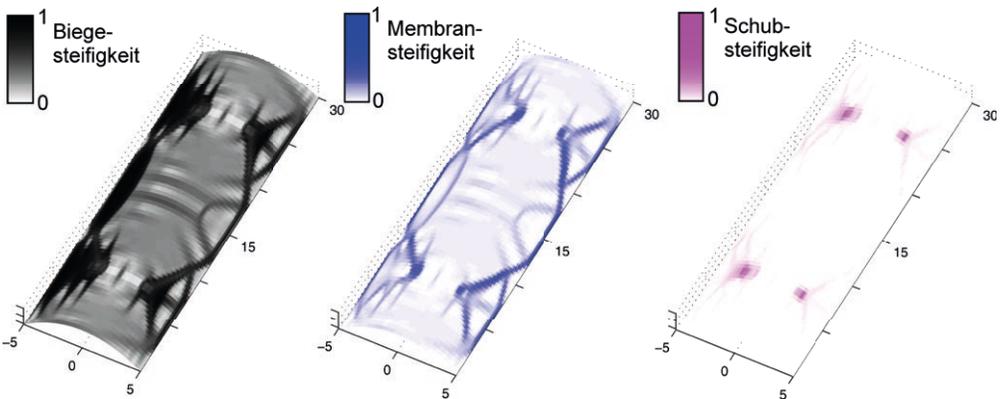


Bild 19: Dichteverteilung der Steifigkeitsanteile bei kombinierter Belastung $g+q$ | Fig. 19: Density distribution for each stiffness components under combined load $g+q$

tionen von ca. 20 % tritt in der vierten Reihe, eine maximale von ca. 55 % in der zweiten auf. Tendenziell ist ein abnehmender Effekt von Reihe 3 zur Reihe 4 festzustellen, sodass kleinere Reduktionen als 20 % ab Reihe 5 nicht zu erwarten sind.

7.2.2 Robuste Dichtedesigns

Die in Abschnitt 7.1.3 entwickelte Methode zur steifigkeitsorientierten Dichteverteilung wurde anhand einer konstanten Flächenlast gezeigt. Durch Implementierung beliebiger Lastfälle als mehrobjektiven Optimierungsansatz und der gewichteten Summennachgiebigkeit als Zielfunktion können beliebige Lastfälle kombiniert und eine robuste Materialverteilung abgeleitet werden. Bild 19 zeigt unter Ansatz einer auf die gesamte Innenfläche wirkenden Flächenlast in Kombination mit einer einseitigen Flächenlast die Materialverteilungen bzgl. der einzelnen Steifigkeitsanteile. Eine zuvor symmetrische Materialverteilung (Abschnitt 7.1.3) wird durch eine antimetrische ersetzt. Materialkonzentrationen zeigen sich nicht nur im Bereich der Auflager, sondern auch am stärker beanspruchten Längsrand, überwiegend ausgeprägt in Form von Biegesteifigkeit, die – in Kombination mit der zur Längsachse unsymmetrisch ausgebildeten Fachwerkstruktur aus MembranstEIFigkeitsanteilen – einen lokal abweichenden optimierten Lastabtrag erzeugt. Der Einfluss der einseitigen Flächenlast wird somit steifigkeitsorientiert berücksichtigt. Eine Kombination mehrerer relevanter Lastfälle führt somit zu einem robusten Design für mittensymmetrische Rippenverstärkungen oder für die Verteilung von Hohlkörpern.

8 Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit von Platten aus Nanodur® mit integrierten Hohlkörpern (TU KL)

8.1 Allgemeines

Zur Auslegung einer Parabolrinne aus Nanodur®-Beton [46] mit im Querschnitt integrierten Hohlkörpern ist es essentiell, das Tragverhalten dieser Struktur zu analysieren. Da eine Kombi-

of several relevant load cases, e.g. dead load, wind and torsion, leads to a robust design for symmetric ribs or for the distribution of void formers.

8 Investigation of the shear force bearing capacity of slabs made of Nanodur® with void formers (TU KL)

8.1 General

For the design of a parabolic trough made of Nanodur® concrete [46] with void formers integrated in the cross-section, it is essential to analyse the load-bearing behaviour of this structure. Since a combination of fine-grained high-performance concrete and void formers has not yet been considered according to the current state of knowledge, tests to determine the load-bearing behaviour were essential. Due to the complex geometry of a parabolically curved shell with a variable cross-section, the investigations described below were carried out on uniaxially clamped plates with void formers.

The investigation of the load-bearing behaviour of hollow core slabs is not new, but so far mainly ceiling systems made of normal strength concrete have been considered [47]. A further difference is that in the systems considered so far a minimum distance of the void formers was required for the formation of strips, whereas in this project the hollow bodies were arranged directly next to each other. The overall goal was to make the cross-section as slim as possible and thus cost-optimized.

8.2 Behaviour of conventional hollow core slabs

The load-bearing behaviour of a conventional hollow core slab is essentially subdivided into the consideration of the bending and transverse load-bearing capacity. The basis of every bending design is the determination of the pressure zone height and the inner lever arm. When considering cross-sections with integrated void formers, two different cases have to be consid-

nation aus einem feinkörnigen Hochleistungsbeton und Hohlkörpern bisher nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht betrachtet wurde, waren Versuche zur Ermittlung des Tragverhaltens unerlässlich. Aufgrund der komplexen Geometrie einer parabolisch gekrümmten Schale mit veränderlichem Querschnitt wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen an einachsig gespannten Platten mit Hohlkörpern durchgeführt.

Die Untersuchung des Tragverhaltens von Hohlkörperplatten ist nicht neu, allerdings wurden bisher vornehmlich Deckensysteme aus Normalbeton betrachtet [47]. Ein weiterer Unterschied ist, dass bei den bisher betrachteten Systemen ein Mindestabstand der Hohlkörper für die Ausbildung von Stegen gefordert war, wohingegen die Hohlkörper in diesem Projekt unmittelbar nebeneinander angeordnet wurden. Insgesamt war es das Ziel, den Querschnitt möglichst schlank und damit kostenoptimiert zu gestalten.

8.2 Tragverhalten konventioneller Hohlkörperdecken

Das Tragverhalten einer konventionellen Hohlkörperdecke untergliedert sich im Wesentlichen auf die Betrachtung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit. Grundlage jeder Biegebemessung ist die Ermittlung der Druckzonenhöhe und des inneren Hebelarms. Bei der Betrachtung von Querschnitten mit integrierten Hohlkörpern sind hierbei zwei unterschiedliche Fälle zu betrachten. Sofern die Druckzonenhöhe im Bereich der Hohlkörper kleiner als die Betondeckung ist, ist eine Biegebemessung nach den üblichen bekannten Verfahren möglich. Ragen die Hohlkörper allerdings bis in den Bereich der Druckzonenhöhe, sind diese bei der Biegebemessung zu berücksichtigen. Bereits in [48] wurde festgestellt, dass die Hohlkörper sowohl die Spannungsverteilung im Querschnitt, als auch den inneren Hebelarm beeinflussen. Ein Bemessungsansatz für Decken mit abgeflachten, rotationssymmetrischen Hohlkörpern kann [47] entnommen werden.

ered. If the pressure zone height in the area of the hollow bodies is smaller than the concrete cover, a bending design according to the usual known methods is possible. However, if the void formers extend into the area of the pressure zone height, these must be taken into account in the bending design. Already in [48] it was determined that the hollow bodies influence both the stress distribution in the cross-section and the inner lever arm. A design approach for ceilings with flattened, rotationally symmetrical hollow bodies can be found in [47].

8.3 Shear force bearing capacity of conventional hollow core slabs

It is well known that the determination of the shear force behaviour of reinforced concrete slabs is very complex. If hollow core elements are arranged in the cross-section, this results in a changed shear force behaviour. Extensive investigations have already been carried out on conventional hollow core slabs, including [16], [47], [49]. Although the design of a hollow core slab is basically possible in the same way as for a ribbed slab, only the existing 'strips' (see Fig. 20, top) are taken into account, not the overall cross-section available. This leads to a very uneconomical design.

In [47] a suitable model for the design of the shear force bearing capacity was developed. In addition, investigations were carried out on the individual load-bearing mechanisms. Essentially, the load bearing capacities of the non-cracked compression zone, of the crack-side tothing as well as due to an anchor effect of the bending reinforcement are used. The investigations were carried out on normal strength concretes up to strength class C50/60. The Nanodur® concrete used in this project does not only differ in strength. The main differences are the significantly smaller maximum grain size with a diameter of only 3 mm and the absence of the strips as described above. It was therefore necessary to conduct our own investigations into the shear strength of reinforced concrete slabs made of Nanodur® concrete with integrated void formers.

8.3 Querkrafttragfähigkeit konventioneller Hohlkörperdecken

Bekanntlich ist die Erfassung des Querkrafttragverhaltens von Stahlbetonplatten sehr komplex. Sind im Querschnitt Hohlkörper angeordnet, hat dies ein verändertes Querkrafttragverhalten zur Folge. Zu konventionellen Hohlkörperdecken wurden bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, u. a. [16], [47], [49]. Zwar ist die Bemessung einer Hohlkörperdecke grundsätzlich analog zu der einer Rippendecke möglich, allerdings wird hierbei nicht der insgesamt zur Verfügung stehende Querschnitt betrachtet, sondern lediglich die vorhandenen „Stege“ gehen in die Bemessung ein (vgl. Bild 20, oben). Dies führt zu einer sehr unwirtschaftlichen Bemessung.

In [47] wurde ein geeignetes Modell zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit entwickelt. Weiterhin wurden Untersuchungen zu den einzelnen Tragmechanismen angestellt. Im Wesentlichen werden hierbei die Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone, der Traganteil der Rissuferverzahnung sowie der Traganteil infolge einer Dübelwirkung der Biegezugbewehrung herangezogen. Die Untersuchungen wurden an Normalbetonen bis zur Festigkeitsklasse C50/60 durchgeführt. Der in diesem Projekt verwendete Nanodur®-Beton unterscheidet sich hiervon nicht nur in der Festigkeit. Wesentliche Unterschiede sind das deutlich kleinere Größtkorn mit einem Durchmesser von nur 3 mm und das Fehlen der oben beschriebenen Stege. Somit war es erforderlich, eigene Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten aus Nanodur®-Beton mit integrierten Hohlköpern durchzuführen.

8.4 Experimentelle Untersuchungen

8.4.1 Versuchsprogramm

Zur Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit wurden Versuchskörper mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen hergestellt und in 3-Punkt-Biegeversuchen geprüft. Die Platten waren 65,7 cm breit, die Hohlkörper jeweils 10 cm hoch. Wesentlicher zu variierender Pa-

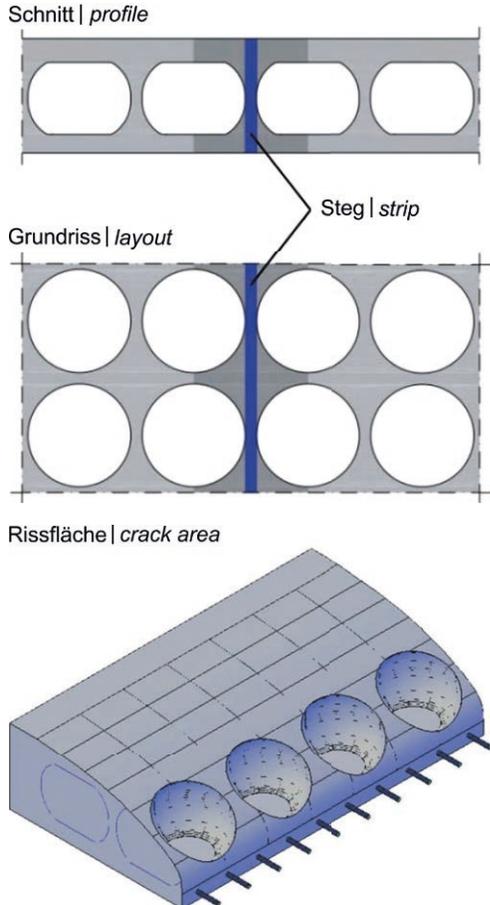


Bild 20: Schnitt und Grundriss einer Hohlkörperdecke (oben) und Rissfläche (unten) bei einachsigem Lastabtrag | **Fig. 20:** Profile and layout of a plate with void formers (top) and crack area (bottom) with uniaxial load transfer

8.4 Experimental investigations

8.4.1 Experimental test program

In order to investigate the shear load bearing capacity, test specimens with different cross-sectional dimensions were produced and tested in 3-point bending tests. The plates were 65.7 cm wide, the void formers had a height of 10 cm each. The main parameter to be varied was the height of the concrete cover of the void formers. For each test type, three tests were carried out on plates with void formers and one reference

Bezeichnung Description	Plattenhöhe Height [cm]	Betondeckung der Hohlkörper Concrete cover above void formers [cm]
V-Q-10-141	14,1	1,6
V-Q-10-160	16,0	2,2
V-Q-10-170	17,0	3,2
V-Q-10-180	18,0	4,2

Tabelle 2: Versuchsprogramm | **Table 2:** Test program

parameter war die Höhe der Betonüberdeckung der Hohlkörper. Für jeden Versuchstyp wurden jeweils drei Versuche an Platten mit Hohlkörpern und ein Referenzversuch ohne Hohlkörper durchgeführt (Tab. 2). Die Platten wurden so konstruiert, dass je Platte zwei Versuche durchgeführt werden konnten. Jede Versuchsreihe setzt sich aus zwei Probekörpern zusammen. Hierbei enthält eine Platte jeweils beidseitig Hohlkörper, die zweiten hingegen nur einseitig, damit auf der gegenüberliegenden Seite der Referenzversuch durchgeführt werden kann.

8.4.2 Versuchskörper im Detail

Die Besonderheit der Versuchsreihe V-Q-10-141 liegt in der Querschnittshöhe, die entgegen allen Konstruktionsregeln lt. [50] so gering wie möglich gehalten wurde. Die Betondeckung für die Bewehrung wurde hier mit lediglich 1 cm zur Bauteilober- und -unterseite hin angesetzt. In Bild 21 ist der Aufbau der Versuchskörper exemplarisch dargestellt.

Die Hohlkörper wurden ohne Zwischenräume parallel zum Bauteilrand verlegt. In Querrichtung liegen sie bündig mit der Betonaußenkante. Als Biegebewehrung wurde Ankerstabstahl St 900/1000 mit einem Durchmesser von 15 mm verwendet. Konventioneller Betonstahl B500 konnte aufgrund der Vorgabe eines realistischen Längsbewehrungsgrades von maximal 2 % und der Einhaltung zulässiger Stababstände nicht verwendet werden. Die Querbewehrung entspricht der Menge nach 20 % des geometrischen Längsbewehrungsgrades. Hierfür wurde ein konventioneller Stabstahl B500B verwendet. Die Betondeckung wurde so gewählt, dass sie ein Mindestmaß von 1 cm nicht unterschreitet. In den Untersuchungen von [51] konnte gezeigt werden, dass die Schädigungsmechanismen durch Chloride oder

test without void formers (Table 2). The plates were designed that two tests could be carried out per plate. Each test series consisted of two test specimens. One plate contained void formers on both sides, while the second one contained void formers on one side only, so that the reference test could be carried out on the opposite side.

8.4.2 Test specimens in detail

The special feature of the test series V-Q-10-141 lies in the cross-section height, which was kept as low as possible contrary to all design rules acc. to [50]. The concrete covering for the reinforcement was set with only 1 cm towards the top and bottom of the component. Fig. 21 shows an example of the structure of the test objects.

The void formers were arranged parallel to the edge of the specimen without gaps. In the transverse direction they are aligned with the outer edge of the concrete. The bending reinforcement used was St 900/1000 with a diameter of 15 mm. Conventional reinforcing steel B500 could not be used due to the specification of a realistic degree of longitudinal reinforcement of maximum 2% and the adherence to permissible bar spacings. The transverse reinforcement corresponds to the quantity after 20% of the geometric longitudinal reinforcement degree. A conventional B500B bar steel was used for this purpose. The concrete covering was chosen so that it does not fall below a minimum of 1 cm. In the investigations of [51] it could be shown that the damage mechanisms caused by chlorides or carbonation have very little effect on the Nano-dur® concrete.

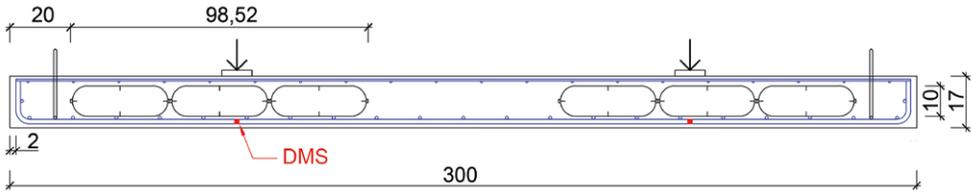
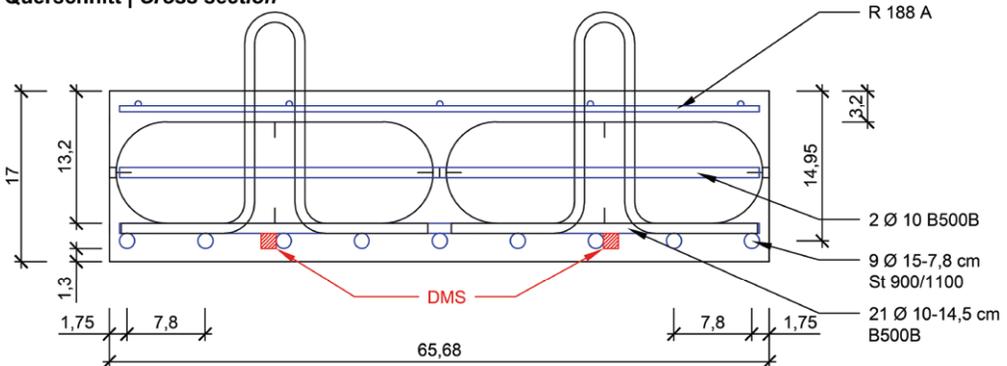
Längsschnitt | Longitudinal section**Querschnitt | Cross section**

Bild 21: Aufbau der Probekörper; hier: Typ V-Q-10-170 | Fig. 21: Structure of the test specimen using the example of V-Q-10-170

Karbonatisierung sehr geringe Auswirkungen auf den Nanodur®-Beton haben.

In Anlehnung an [47] wurde eine Breite der Versuchskörper b zu $\geq 4 h$ (Probekörperhöhe, vgl. Tab. 2) gewählt. Dabei konnten in Querrichtung zwei Hohlkörperreihen nebeneinander angeordnet werden. Eine geringfügige Unterschreitung der Mindestbreite bei der Versuchsreihe V-Q-10-180 wurde akzeptiert. Des Weiteren wurde zur Vermeidung eines Effektes durch auflagernahe Einzellasten eine Schubschlankheit von $a / d \geq 4$ angestrebt, wobei a den Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager und d die statische Höhe des jeweiligen Probekörpers wiedergibt.

8.4.3 Betonherstellung und Materialkennwerte

Es wurden Vorversuche durchgeführt, um die Betonierbarkeit des Nanodur®-Betons unter Verwendung der vorhandenen Laborausstattung in Chargen von bis zu 400 l zu prüfen. Daraus wurde eine von der Empfehlung des Herstellers [46] etwas abweichende Rezeptur für wiederkehrende Betonagen in dieser Grö-

Based on [47], the width of the test specimens was chosen to $b \geq 4 h$ (test specimen height, see Table 2). Two rows of void formers could be arranged next to each other in the transverse direction. A slight underrun of the minimum width in the test series V-Q-10-180 was accepted. Furthermore, a shear slenderness of $a / d \geq 4$ was aimed in order to avoid an effect caused by individual loads close to the support, where a represents the distance between load introduction and support and d the static height of the respective test specimen.

8.4.3 Concrete production and material properties

Preliminary tests were carried out to test the concreteability of Nanodur® concrete in batches of up to 400 l using the existing laboratory equipment. This was used to develop a formulation for recurring concretes of this size, which differed somewhat from the manufacturer's recommendation [46] (Table 3). Instead of a white cement, a grey one was used. The hardened concrete parameters (Table 4) were determined after 28 days of wet storage of the samples.

Ausgangsstoff Material	Anteil Weight proportion [kg/m³]
Nanodur® Compound 5941 grau grey	1.050
Rheinsand 0/2 Rhine sand 0/2	430
Basaltsplitt 1/3 Basalt grit 1/3	880
Zugabewasser Mixing water	162
Fließmittel Super-plasticizer Glenium ACE 430 ^{*)}	13,65
Schwindreduzierer Shrinkage reducing admixture Eclipse® Floor	6,0

^{*)} entspricht 3,3 M.-% Zementgehalt | equal to 3.3 m% cement content

Tabelle 3: Betonrezeptur | **Table 3:** Concrete recipe period II

Benordnung entwickelt (Tab. 3). Auf einen Erhärtungsbeschleuniger wurde vollständig verzichtet. Anstatt eines Weißzementes kam ein Grauzement zum Einsatz. Die Festbetonkennwerte (Tab. 4) wurden nach 28 Tagen Nasslage der Proben bestimmt.

Da bei einer Serienfertigung von Solarkollektoren aus Beton nicht nur geringe Ausschulfristen präferiert werden, sondern auch die Festigkeitsentwicklung eine wichtige Rolle spielt (Aufbringen der Spiegelfläche, Transport zum Kollektorfeld etc.), wurde diese anhand einer Versuchsreihe bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Druckfestigkeit innerhalb der ersten drei Tage bereits auf einen Wert von 87 % der Druckfestigkeit nach 28 Tagen im Wasserbad ansteigt. Nach sieben Tagen sind 90 % und nach 14 Tagen sind bereits 100 % erreicht. Somit ist es möglich, die Bauteile unmittelbar nach dem Ausschalen weiter zu bearbeiten und an den Aufstellort zu verbringen. Dies spart Zeit, Lagerfläche und trägt somit zu einer deutlichen Kostenreduktion bei.

8.4.4 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Kaiserslau-

Since not only short stripping times are preferred for series production of solar collectors made of concrete, but also the strength development plays an important role (application of the mirror surface, transport to the collector field, etc.), it has been determined on the basis of a series of tests. It was found that the compressive strength increases within the first three days to a value of 87% of the compressive strength after 28 days in a water bath. After seven days 90% are reached and after 14 days 100% are already reached. This makes it possible to process the components immediately after stripping and transport them to the installation site. This saves time and storage space and thus contributes to a significant reduction in costs.

8.4.4 Manufacturing of the test specimens

The test specimens were produced in the laboratory for structural engineering at the TU Kaiserslautern. Each slab was concreted individually. The void formers, type cobiax® Slim-Line S-100 [55], consist of two half-shells each, which are joined together using a patent fastener (Fig. 22, top). Fastening and securing of the position was carried out by screwing to the formwork base. In addition, a reinforcing steel mesh was arranged above the void formers and fixed to the lower re-

Materialeigenschaft Material property	Wert Value
Elastizitätsmodul Young's modulus ^{*)}	47.708,3 N/mm²
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength ^{**)}	10,3 N/mm²
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	130,4 N/mm²
Festbetonrohddichte Density	2.524,2 kg/m³

^{*)} Zylinder | Cylinder Ø 150 mm, h = 300 mm, nach | acc. to DIN EN 12390-3 [52]; ^{**) nach | acc. to DIN EN 196-1 [53]}

Tabelle 4: Festbetonkennwerte | **Table 4:** Material properties of the hardened Nanodur® concrete in period II

tern hergestellt. Jede Platte wurde einzeln betoniert. Die verwendeten Hohlkörper vom Typ cobiax® Slim-Line S-100 [55] bestehen jeweils aus zwei Halbschalen, die per Patentverschluss zusammengefügt werden (Bild 22, oben). Die Befestigung und Lagesicherung erfolgte durch Verschraubung mit dem Schalboden. Zusätzlich wurde eine Betonstahlmatte oberhalb der Hohlkörpern angeordnet und mit Bindedraht zur unteren Bewehrung hin fixiert (Bild 22, unten). Die erforderliche Höhenlage wurde mittels Abstandhaltern zwischen den Hohlkörpern und der Betonstahlmatte hergestellt.

8.4.5 Versuchsaufbau und -durchführung

Die 3-Punkt-Biegeversuche wurde mithilfe eines servo-hydraulischen Prüfzylinders durchgeführt. Die Position der Lasteinleitung wurde so gewählt, dass eine etwa 20 % höhere Querkraft an dem äußeren Auflager (bezogen auf die gesamte Platte) auftritt, um ein Querkraftversagen in diesem Bereich zu erzwingen.

Der jeweils unbelastete Plattenteil wurde während des Versuchs fortlaufend unterstützt, damit keine ungewollten Schnittkräfte durch diesen Kragarm in den untersuchten Bereich eingeleitet wurden. Die Auflagerung erfolgte auf Rollenlagern, damit eine störungsfreie Verdrehung möglich war. Zwischen der Rollenlagerung und dem Probekörper wurden Stahlbleche mit den Abmessungen $b \times h = 100 \times 20$ mm und ein Elastomer mit einer Stärke von 1 cm angeordnet. Im Bereich der Lasteinleitung wurde ein Lastverteilungsträger eingesetzt, der wiederum auf einem Elastomer mit einer Stärke von 1 cm gelagert wurde. Oberhalb des Lastverteilungsträgers wurde eine Kalotte auf zwei Lagen PTFE-Folie angeordnet, damit sowohl geringe Verdrehungen als auch Verschiebungen während des Versuchs ermöglicht werden konnten. Zum besseren Verständnis der Rissverläufe wurde die Lage der Hohlkörper bereits vor Versuchsbeginn auf den Probekörpern eingezeichnet (Bild 23).

Es wurden induktive Wegaufnehmer (IWA) und jeweils über den Auflagern und in den Viertelpunkten angeordnet, zudem noch 2 IWA un-



Bild 22: Detail Hohlkörper cobiax® Slim-Line S-100 (oben), Hohlkörper nach Einbau (unten) | **Fig. 22:** Detail cobiax® S-100 void former (top), void former after assembly (bottom)

inforcement with steel wire (Fig. 22, bottom). The required height was achieved by spacers between the void formers and the reinforcing steel mesh.

8.4.5 Test setup and execution

The 3-point bending tests were carried out with a servo-hydraulic test cylinder. The position of the load introduction was chosen so that an approximately 20% higher transverse force occurs at the outer support (relative to the entire plate) in order to force a shear force failure in this area.

The unloaded part of the slab was continuously supported during the test so that no unwanted forces were introduced into the examined area by this cantilever arm. The support was made on roller bearings so that a free rotation was possible. Steel sheets measuring $w \times h = 100 \times 20$ mm and an elastomer with a thickness of 1 cm were placed between the roller bearing and the test specimen. A load distribution beam was used in the load introduction area, which was supported on an elastomer with a thickness of 1 cm. Above the load distribution beam, a calotte was placed on two layers of PTFE foil to allow both minor twisting and displacement during the test. For a better understanding of

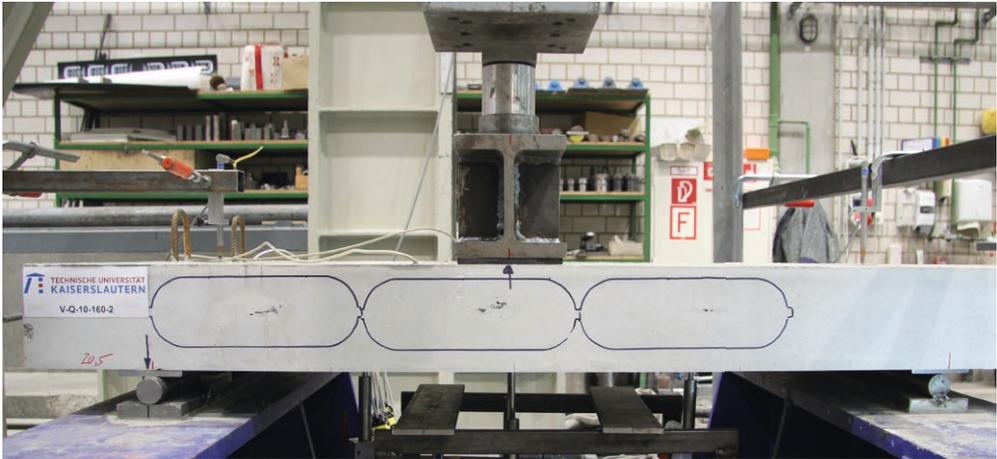


Bild 23: Versuchsaufbau am Beispiel V-Q-10-160-2 | Fig. 23: Test setup using the example of V-Q-10-160-2

terhalb der Lasteinleitung über die Breite des Probekörpers verteilt. Die Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden in den Drittelpunkten des Querschnitts direkt an der Biegezugbewehrung angebracht (s. Bild 21).

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurden 10 Lastzyklen auf Gebrauchslastniveau weggesteuert aufgebracht. Dies dient der Ausbildung eines abgeschlossenen Rissbildes und verhindert eine Überschätzung der tatsächlichen Bruchlast durch Verkanten der Rissflanken im Falle einer direkten Ansteuerung der Bruchlast. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass das Gebrauchslastniveau innerhalb von zwei Minuten erreicht wurde. Die Last wurde dann drei Minuten aufrechterhalten und anschließend wieder auf 1 kN gesenkt. Nach Erreichen der 10 Lastzyklen wurde die Last in Schritten von je 10 % der Gebrauchslast bis zum Bruch gesteigert.

8.4.6 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung und die Versuchsergebnisse aufgezeigt. Während der Versuche wurden nach jedem der 10 Lastzyklen und bei jeder weiteren Laststufe die Rissfortschritte markiert. In Bild 24 sind die Rissverläufe sowohl nach dem ersten und dem zehnten Lastzyklus (schwarze Markierung), als auch bis zum Bruch-

the crack paths, the position of the void formers was already drawn on the test specimens before the start of the test (Fig. 23).

Inductive displacement transducers (IWA) were installed above the supports and in the quarter points, and 2 IWA were distributed over the width of the test specimen below the load introduction. The strain gauges (DMS) were attached directly to the bending reinforcement in the third points of the cross-section (Fig. 21).

At the beginning of the test, 10 load cycles were applied in a displacement-controlled manner at service load level. This serves to form a closed crack pattern and prevents an overestimation of the actual breaking load due to tilting of the crack flanks in the case of direct initiation of the breaking load. The loading speed was selected so that the service load level was reached within two minutes. The load was then maintained for three minutes and subsequently reduced to 1 kN. After the 10 load cycles had been reached, the load was increased in steps of 10% of the service load until breakage.

8.4.6 Test results

In the following the observations during the test and the results are shown. During the tests, the crack propagation was marked after each of the

zustand (Lastschritte in roter Markierung) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bereits nach einmaliger Belastung sowohl Biegerisse unterhalb der Lasteinleitung als auch Risse im Bereich der Hohlkörper auftreten. Diese Risse weisen eine stufenähnliche Form, mit horizontalem Abschnitt in der Hohlkörperachse auf. Weiterhin fällt auf, dass die Risse z. T. bereits bis in den Bereich der Betondruckzone verlaufen. Nach Abschluss des zehnten Lastzyklus ist das Rissbild nahezu unverändert. Der Versagensriss (vgl. Bild 24, unten) ist links der Lasteinleitung aus einem Biegeriss entstanden und somit, anders als nach der Vorbemessung zu erwarten, im Bereich des inneren Auflagers. Im Bruchzustand trat das Versagen schlagartig ein, gekennzeichnet durch ein instabiles Risswachstum des maßgebenden

10 load cycles and at each subsequent load stage. Fig. 24 shows the crack propagation after the first and tenth load cycle (black marking) and up to the state of fracture (load steps in red marking). It can be seen that already after the first loading bending cracks below the load introduction and cracks in the void former area occurred. These cracks have a step-like shape with a horizontal section in the void former axis. It is also noticeable that some of the cracks already run into the area of the concrete pressure zone. After completion of the tenth load cycle, the crack pattern was almost unchanged. The failure crack (cf. Fig. 24, below) has arisen from a bending crack to the left of the load introduction and thus, contrary to what can be expected after the preliminary design, in the area of the inner support. In

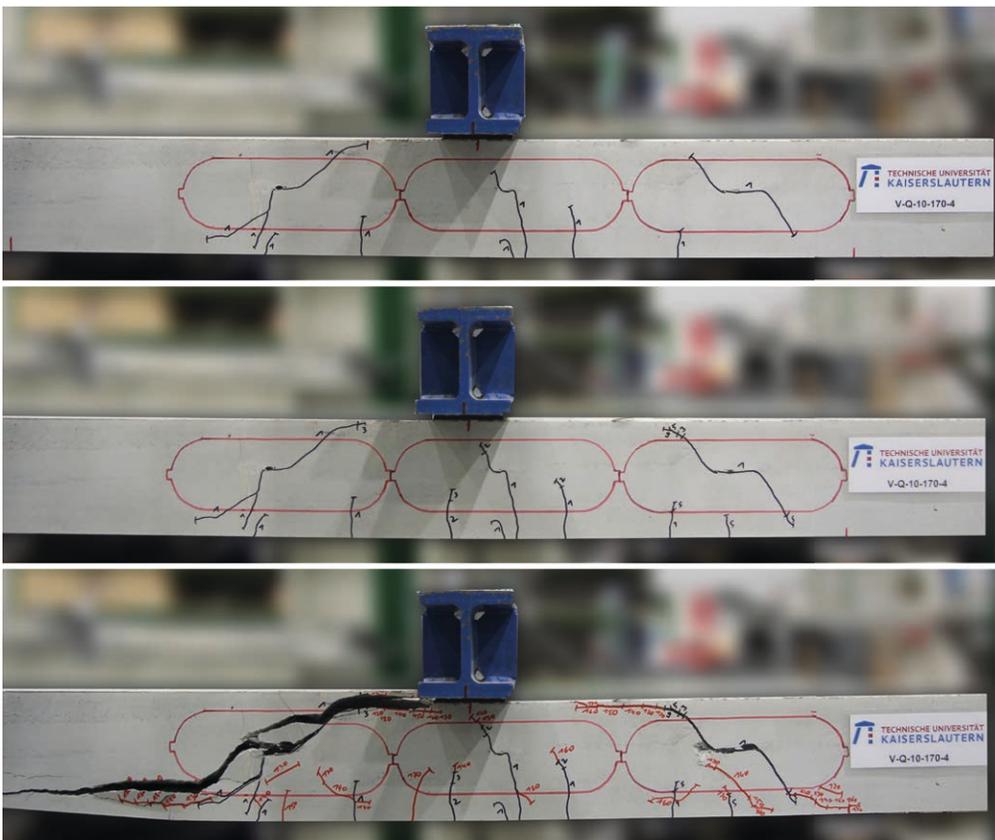


Bild 24: Rissverläufe am Beispiel V-Q-10-170-4, oben: 1. Zyklus GZG, Mitte: 10. Zyklus GZG, unten: Bruchzustand | **Fig. 24:** Crack pattern of specimen V-Q-10-170-4, top: 1st cycle SLS, centre: 10th cycle SLS, bottom: failure state

Biegeschubrisses bis hin zur Lasteinleitung und auftretendem Sekundärriss.

Im Wesentlichen konnten dieser Rissverlauf und das Eintreten des Bruchzustandes bei allen Versuchen festgestellt werden. Im Unterschied dazu trat der Versagensriss bei den Referenzproben jeweils rechts der Lasteinleitung, d. h. am äußeren Auflager, auf.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wird ein Abminderungsfaktor d_{vf} bestimmt, der den Einfluss der Hohlkörper auf die Querkrafttragfähigkeit einer Platte aus Nanodur®-Beton ohne Querkraftbewehrung nach Gl. 6.2a in DIN EN 1992-1-1 [50] (s. Gl. (3)) widerspiegelt. Lt. [54] gibt der Vorfaktor $C_{Rd,c}$ einen empirisch ermittelten Wert unter Berücksichtigung des erforderlichen Zuverlässigkeitsindex für einen Zeitraum von 50 Jahren wieder. Er wurde anhand zahlreicher Querkraftversuche mit Normalbeton kalibriert, die Übertragbarkeit auf den Nanodur®-Beton ist folglich nicht per se gegeben. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage werden die nachfolgenden Betrachtungen dennoch in Anlehnung an [54] mit $C_{Rd,c} = 0,2$ durchgeführt. Als Betondruckfestigkeit wird die mittlere Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} angesetzt (Gl. 3). Weitere Bestandteile sind der Maßstabsfaktor k , der Längsbewehrungsgrad ρ_l , die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone b_w sowie die statische Höhe d . Betonlängsspannungen σ_{cp} werden nicht angesetzt.

the fracture state, the failure occurred abruptly, characterized by an unstable crack growth of the decisive bending shear crack up to load introduction and occurring secondary crack.

Essentially, this crack pattern and the occurrence of the fracture condition could be determined in all tests. In contrast, the failure crack occurred in the reference specimens to the right of the load introduction, i.e. at the outer support.

For better comparability, a reduction factor d_{vf} is determined, which reflects the influence of void formers on the shear strength of a slab of Nanodur® concrete without shear reinforcement acc. to Eq. 6.2a in DIN EN 1992-1-1 [50], Eq. (3). Acc. to [54], the pre-factor $C_{Rd,c}$ represents an empirically determined value for a period of 50 years, taking into account the required reliability index. It was calibrated by means of numerous shear force tests with normal strength concrete, the transferability to the Nanodur® concrete is therefore not given per se. Due to the missing data basis, the following considerations are nevertheless carried out on the basis of [54] with $C_{Rd,c} = 0,2$. The concrete compressive strength in Eq. (3) is assumed to be the mean cylinder compressive strength f_{cm} . Further components are the scale factor k , the longitudinal reinforcement degree ρ_l , the smallest cross-section width within the tensile zone b_w as well as the static height d . The longitudinal stresses σ_{cp} are not considered.

$$V_{Rm,c}^{[N]} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

Anhand der Tests ergibt sich ein Abminderungsfaktor d_{vf} nach Gl. (4):

$$d_{vf} = \frac{V_u}{V_{Rm,c}} = \frac{V_u}{0,2 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_w \cdot d} \quad (4)$$

Nachfolgend wird der ermittelte Vorfaktor d_{vf} der statischen Höhe d (Bild 25) und der ermittelten Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} (Bild 26) gegenübergestellt. In den Diagrammen ist zu erkennen, dass der Abminderungsfaktor zwischen 0,4 und 0,5 liegt. Ausnahme ist die Versuchsreihe mit

The tests result in a reduction factor d_{vf} acc. to Eq. (4):

$$d_{vf} = \frac{V_u}{V_{Rm,c}} = \frac{V_u}{0,2 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_w \cdot d} \quad (4)$$

In the following, the determined pre-factor d_{vf} is compared with the static height d (Fig. 25) and the determined cylinder compressive strength f_{cm} (Fig. 26). The diagrams show that the reduction factor lies between 0.4 and 0.5. The exception is the test series with a plate thickness of

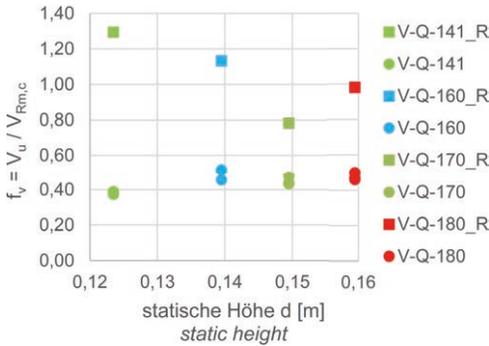


Bild 25: Faktor d_{vf} in Abhängigkeit der statischen Höhe d | **Fig. 25:** Coefficient d_{vf} as a function of static height d

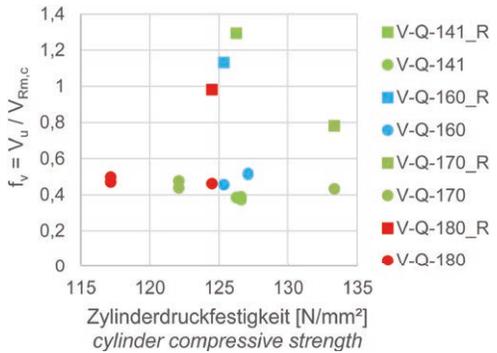


Bild 26: Faktor d_{vf} in Abhängigkeit der ermittelten Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} | **Fig. 26:** Coefficient d_{vf} as a function of cylindrical compressive strength f_{cm}

14,1 cm Plattendicke. Der hier berechnete Faktor liegt im Mittel bei 0,38. Die Betondruckfestigkeit hat gem. Bild 26 keine Auswirkung auf d_{vf} . Dies und die bei allen Versuchsreihen identischen Randbedingungen lassen darauf schließen, dass die Verwendung der Hohlkörper S-100 bei der Versuchsreihe V-Q-10-141 zu einer Beeinflussung der Druckzone und damit einhergehend zu einer weiteren Abminderung der Querkrafttragfähigkeit führt. Ab 16 cm Plattenstärke und damit verbunden einer Betonüberdeckung der Hohlkörper von mind. 2,2 cm ist davon auszugehen, dass die Druckzone durch die Verwendung der Hohlkörper nicht beeinträchtigt wird. Der Mittelwert aller durchgeführten Referenzversuche liegt etwa bei 1,1. Eine Auswertung in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 [50] und Heft 600 [54] erscheint unter Berücksichtigung der begrenzten Datengrundlage somit als gerechtfertigt.

Konservativ betrachtet beträgt der Abminderungsfaktor $d_{vf} = 0,35$. Gegenüber dem in [47], [55] und [56] festgelegten Abminderungsfaktor $f_v = 0,5$ stellt dies eine weitere Reduzierung der Tragfähigkeit dar. In [47] wurde ein modifiziertes Bemessungsmodell nach [57] zur Ermittlung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit von Hohlkörperdecken hergeleitet. Im Wesentlichen beruht dieses Bemessungsmodell auf der Kombination der drei Hauptquerkrafttraganteile ungerissene Druckzone, Rissreibung und Dübelwirkung. Im Modell von [47] wurde der negative Einfluss der Hohlkörper auf die Haupttraganteile bereits berücksichtigt. Im direkten Vergleich

14,1 cm. The average factor calculated here is 0.38. Acc. to Fig. 26, the concrete compressive strength has no effect on d_{vf} . This circumstance and the identical boundary conditions in all test series lead to the conclusion that in the test series V-Q-10-141 the use of void formers of type S-100 leads to an influence on the pressure zone and thus to a further reduction in the shear force bearing capacity. From a plate thickness of 16 cm and a concrete covering of the void formers of at least 2.2 cm, it can be assumed that the pressure zone will not be affected by the use of these. The mean value of all reference tests performed is approximately 1.1. An evaluation based on DIN EN 1992-1-1 [50] and DAFStb Book 600 [54] thus appears to be justified under consideration of the limited data basis.

Conservatively the reduction factor can be determined to $d_{vf} = 0.35$. Compared to the reduction factor $f_v = 0.5$ defined in the investigations in [47], [55], [56], this represents a further reduction in the load carrying capacity. In [47], a modified design model acc. to [57] was derived to determine the calculated shear load carrying capacity of hollow core slabs. Essentially, this design model is based on the combination of the three main transverse load bearing components: non-cracked pressure zone, crack friction and dowel effect of the bending reinforcement. In the model of [47], the negative influence of the void formers on the main load-bearing elements has already been taken into account. In the direct comparison of these considerations

dieser Überlegungen mit den hier durchgeführten Untersuchungen unterscheidet sich der Nanodur®-Beton von dem bisher betrachteten Normalbeton im Wesentlichen durch die höhere Zug- und Druckfestigkeit und das Größtkorn von nur 3 mm. Insbesondere letzteres kann den Traganteil der Rissverzahnung negativ beeinflussen. Ein kleineres Größtkorn bedeutet in diesem Fall eine geringere Verzahnungstiefe. Des Weiteren ist durch die Verwendung eines hochfesten Betons ein Rissverlauf durch das Korngefüge hindurch möglich. Durch die spezielle Anordnung der Hohlkörper wird die ohnehin nur geringe Verzahnungsfläche noch weiter herabgesetzt. Es wird vermutet, dass durch die große Zug- und Druckfestigkeit des Nanodur®-Betons Reserven in der Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone und der Dübeltragwirkung aktiviert werden und die verringerte Tragfähigkeit der Rissverzahnung in einem bestimmten Ausmaß kompensiert wird.

with the investigations carried out here, the Nanodur® concrete differs from the previously considered normal strength concrete essentially by the higher tensile and compressive strength and the maximum grain size of only 3 mm. In particular, the selection of the maximum grain size can have a negative effect on the bearing portion of the crack tothing. In this case, a smaller maximum grain size means a smaller tothing depth. Furthermore, the use of a high-strength concrete allows the crack to run through the grain structure. The special arrangement of the void formers even further reduces the already small tothing surface. It is assumed that the high tensile and compressive strength of Nanodur® concrete activates reserves in the load-bearing capacity of the non-cracked compression zone and the dowel load-bearing effect and compensates for the reduced load-bearing capacity of the crack tothing to a certain extent.

$$V_{Rd,c,vf}^{[N]} = d_{vf} \cdot \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Untersuchungen kann die Querkrafttragfähigkeit von Platten ohne Querkraftbewehrung aus Nanodur® mit integrierten Hohlkörpern des Typs cobiax® S-100 nach Gl. (5) und unter Verwendung des konservativ angesetzten Abminderungsfaktors $d_{vf} = 0,35$ berechnet werden. Die Höhe des oberen Betonspiegels darf hierbei einen Wert von 2,2 cm nicht unterschreiten. Eine allgemeingültige Bemessungsempfehlung kann anhand der hier beschriebenen Versuche nicht ausgesprochen werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen, insbesondere mit Variation der Hohlkörpergrößen und -anordnung erforderlich.

Taking into account all investigations carried out, the shear force bearing capacity without shear force reinforcement of slabs made of Nanodur® concrete with integrated void formers of the type cobiax® S-100 can be calculated acc. to Eq. (5) and using the conservatively applied reduction factor $d_{vf} = 0.35$. The height of the upper concrete level must not fall below a value of 2.2 cm. A generally valid design recommendation cannot be made based on the tests described here. This requires further investigations, in particular with variation of the void former sizes and arrangement.

9 Demonstratoren (TU KL)

9.1 Leichte Schale aus Hochleistungsbeton als Parabolrinne für solarthermische Kraftwerke

9.1.1 Entwurf

Zur Verdeutlichung der generellen Machbarkeit einer dünnwandigen Schale aus Nanodur®-

9 Demonstrators (TU KL)

9.1 Light-weight shell made of high-performance concrete as parabolic trough for solar thermal power plants

9.1.1 Design

To illustrate the general feasibility of a thin-walled shell of Nanodur® concrete as a para-

Beton als Parabolrinne für solarthermische Kraftwerke wurde in Phase I des SPP an der TU KL ein Demonstratormodul von 3,2 m Länge hergestellt. Das Konzept wurde an den bestehenden Kollektortyp IST PT-1 angelehnt, der auf dem Testgelände des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) bereits ausführlich auf die thermische Wirksamkeit hin geprüft wurde [58]. Die Geometriedaten sind Bild 27 zu entnehmen. Die Schale ist insgesamt sehr schlank ausgeführt.

9.1.2 Material

Grundlage des Nanodur®-Betons ist das bereits beschriebene Nanodur® Compound 5941. Dieses wird mit Wasser, Sand, Gesteinskörnung, Fließmittel, Schwindreduzierer und ggf. Erhärtungsbeschleuniger vermischt. Im Rahmen dieses Projekts wurden an der TU KL unterschiedliche Mischungszusammensetzungen hinsichtlich Druck- und Zugfestigkeit als auch Festigkeitsentwicklung geprüft. Die Mischungen unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Anteil des Erhärtungsbeschleunigers (Tab. 5). Erwartungsgemäß nimmt die Festigkeitsentwicklung mit zunehmendem Gehalt des Erhärtungsbeschleunigers zu. Durch seine speziellen Eigenschaften und die zähe aber doch sehr fließfähige Konsistenz wird empfohlen, die Rezeptur für jeden Anwendungsfall individuell anzupassen. Für die Herstellung des Demonstrators konnte nach Abschluss der Untersuchungen die Mischung M2 empfohlen werden [51].

Parabolic trough for solar thermal power plants, a demonstrator module 3.2 m long was produced in phase I of the SPP at the TU KL. The concept was based on the existing collector type IST PT-1, which has already been extensively tested for its thermal effectiveness at the test site of the German Aerospace Center (DLR) [58]. The geometry data is shown in Fig. 27. The shell is very slim overall.

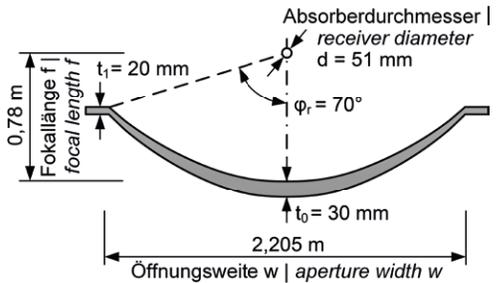


Bild 27: Abmessungen des Demonstratormoduls | Fig. 27: Dimensions of the prototype

9.1.2 Material

The Nanodur® concrete is based on the already described Nanodur® Compound 5941, which is mixed with water, sand, aggregates, superplasticizer, shrinkage reducer and, if necessary, hardening accelerator. Within the scope of this project, different compound compositions were tested at the TU KL with regard to compressive and tensile strength as well as strength development. The compounds differ essentially in the proportion of hardening accelerator (Table 5). As expected, the strength develop-

Ausgangsstoff Material	Anteil Weight proportion in [kg/m³]		
	M1	M2	M3
Nanodur® Compound 5941 weiß white		1.042	
Rheinsand 0/2 Rhine sand 0/2		426	
Basaltsplitt 1/3 Basalt grit 1/3		882	
Zugabewasser Mixing water	160,0	147,7	135,4
Fließmittel Super-plasticizer Glenium ACE 430 ¹⁾		20,3	
Schwindreduzierer Shrinkage reducing admixture Eclipse® Floor		8	
Erhärtungsbeschleuniger Hardening accelerator X-SEED® 100	-	12,3	24,6

¹⁾ entspricht 3,3 M.-% Zementgehalt | Equal to 3.3 m% cement content

Tabelle 5: Betonrezepturen | Table 5: Concrete recipes

Materialeigenschaft Material property	Wert Value
Elastizitätsmodul Young's modulus	47.593 N/mm ²
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength	15,1 N/mm ²
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	109,1 N/mm ²
Festbetonrohddichte Density hardened concrete	2.524 kg/m ³

Tabelle 6: Festbetonkennwerte | **Table 6:** Material properties of the hardened Nanodur® concrete

Die Mittelwerte der Festbetonkennwerte sind in Tabelle 6 dargestellt.

9.1.3 Herstellung

Der Demonstrator wurde vollständig an der TU Kaiserslautern hergestellt [22]. Als Schalung für das Kollektormodul wurde eine Fratec®-Sonderschalung der Firma Max Frank GmbH und Co. KG verwendet. Diese besteht aus einem zugeschnittenen Polystyrolkern mit einer selbstklebenden Folie als Schalhaut. Die Schale wurde liegend betoniert, wobei der Beton vom Scheitel aus eingefüllt wurde, um mögliche Luft einschüsse zu vermeiden. Als Bewehrung wurde eine konventionelle Betonstahlmatte Typ Q188A verwendet, die ausschließlich zum Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit dient.

Für die Verspiegelung der Betonoberfläche standen mehrere Konzepte wie z. B. Glas- oder Silberspiegel, Aluminiumblech und Reflektorfolie zur Auswahl. Aufgrund der notwendigen manuellen Applizierung wurde ein PVD-beschichtetes Aluminiumblech (*Physical Vapour Deposition*) mit einer Stärke von 0,5 mm verwendet. Dieses wurde mit einem Konstruktionsklebstoff der Firma Sika auf der Betonoberfläche fixiert.

Abschließend wurden die Unterbauten zusammengefügt. Das Element ruht auf der patentrechtlich geschützten Abrollkonstruktion [13], Abschnitt 4. Bei der Nachführung bewegt sich der Schwerpunkt der Gesamtkonstruktion auf einer horizontalen Ebene. Dies reduziert den notwendigen Energieaufwand des Antriebs erheblich. Bild 28 zeigt den fertig installierten Demonstrator auf dem Dach eines Laborgebäudes der TU Kaiserslautern.

ment increases with increasing content of the hardening accelerator. Due to its special properties and tough yet very free-flowing consistency, it is recommended that the formulation be adapted individually for each application. For the production of the demonstrator the mixture M2 could be recommended after completion of the investigations [51].

The mean values of the hardened concrete are shown in Table 6.

9.1.3 Manufacturing process

The demonstrator was manufactured entirely at the TU Kaiserslautern [22]. A Fratec® special formwork from Max Frank GmbH & Co. KG was used as formwork for the collector module. It consists of a cut-to-size polystyrene core with a self-adhesive film as formwork skin. The shell was concreted horizontally, whereby the concrete was filled in from the apex in order to avoid possible air inclusions. As reinforcement, a conventional reinforcing steel mesh type Q188A was used, which serves exclusively for the ultimate limit state.

Several materials such as glass or silver mirrors, aluminium sheet and reflector foil were available for mirroring the concrete surface. Due to the necessary manual application, a PVD-coated aluminium sheet (physical vapor deposition) with a thickness of 0.5 mm was used. This was fixed to the concrete surface with an adhesive from Sika.

Finally, the substructures were joined together. The element is supported by on the patented roll-off construction [13], section 4. During sun-tracking, the centre of gravity of the entire construction moves on a horizontal plane. This considera-

9.1.4 Vermessung

Zur Überprüfung der Formgenauigkeit und Validierung der vorausgegangenen Untersuchungen an der RUB wurde der Demonstrator in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vermessen. Die Vermessung erfolgte mithilfe der digitalen Nahbereichsfotogrammetrie, einem berührungslosen Messverfahren mit dem die Koordinaten charakteristischer Punkte im Raum ermittelt werden können. Diese Punkte wurden im Vorhinein mithilfe von insgesamt 200 Messmarken auf der Reflektoroberfläche markiert. Durch die Aufnahme von Fotos aus unterschiedlichen Blickwinkeln lassen sich dann geometrische Beziehungen zwischen den Messpunkten ableiten und die Punktkoordinaten exakt bestimmen [59]. Die am Demonstrator ermittelten Koordinaten wurden mit der Soll-Form einer idealen verglichen, um die Abweichungen zu bestimmen. In Bild 29 (links) ist die gemessene Verformung, welche maßgeblich im Bereich von ± 5 mm variiert, über die Kollektoroberfläche dargestellt. Anhand der Verformung konnte die Winkelabweichung der reflektierten Solarstrahlen bestimmt werden, welche mit der in Abschnitt 3 beschriebenen Akzeptanzfunktion f_{PT} , Gl. (1), bewertet wurde, und so die lokalen, optische Wirksamkeiten über die Oberfläche bestimmt werden (Bild 29, rechts). Es zeigt sich, dass z. T. Randbereich keine optische Wirksamkeit mehr besitzen, also die reflektierte Strahlung für diese Bereiche nicht auf das Absorberrohr gebündelt werden kann. Dennoch besitzt der Demonstrator global eine optische Wirksamkeit von 94 %.

9.2 Demonstrator mit integrierten Hohlkörpern

Auch in der zweiten Phase des gemeinsamen Projekts war ein Großdemonstrator aus Nanodur®-Beton geplant, nun mit integrierten Hohlkörpern. Dieser befindet sich zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes jedoch noch in der Herstellung. Der 1,5 m lange Demonstrator entspricht der Form des in Abschnitt 4 behandelten Moduls mit einer Aperturweite von 10 m und wurde, durch herstellungsbedingte Re-

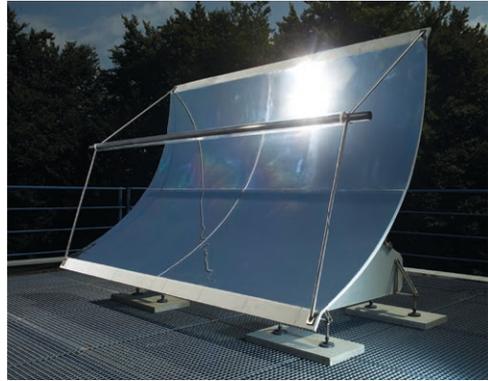


Bild 28: Großdemonstrator der TU Kaiserslautern |
Fig. 28: Prototype at TU Kaiserslautern

bly reduces the energy required by the drive. Fig. 28 shows the fully installed demonstrator on the roof of a TU Kaiserslautern laboratory building.

9.1.4 Surface measurement

The demonstrator was measured in cooperation with the German Aerospace Center (DLR) to check the shape accuracy and validate the previous investigations at the RUB. The measurement was carried out with the help of digital close-range photogrammetry, a non-contact measuring method with which the coordinates of characteristic points in space can be determined. These points were marked in advance on the reflector surface using a total of 200 measuring marks. By taking photographs from different angles, geometric relationships between the measuring points can be derived and the point coordinates precisely determined [59]. The coordinates measured at the demonstrator were compared with the nominal shape of an ideal one in order to determine the deviations. Fig. 29 (left) shows the measured deformation, which varies significantly in the range of ± 5 mm over the collector surface. Based on the deformation, the angular deviation of the reflected solar rays could be determined, which was evaluated with the acceptance function f_{PT} , Eq. (1), described in section 3, and thus the local optical efficiencies could be determined over the surface (Fig. 29, right). It is shown that some

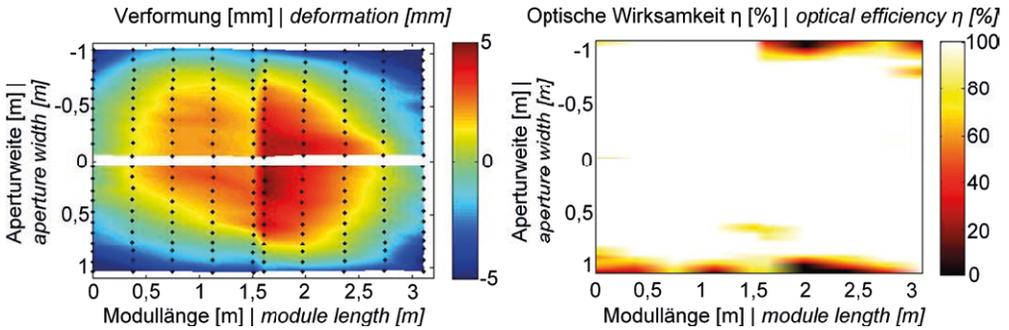


Bild 29: Gemessene Verformungen (links) und ermittelte optische Genauigkeit (rechts) | Fig. 29: Measured deformations (left) and optical efficiency (right)

strikationen im Labor, mit dem Faktor 0,3 skaliert. Die Geometrie und Abmessungen sind in Bild 30 dargestellt. Die Fokallänge, also der Abstand vom Scheitelpunkt der Spiegelfläche bis zum Brennpunkt der Parabelgeometrie beträgt 894 mm. Die Lagerung der Parabolrinne erfolgt auf Abrollsieheln, die an der Unterseite der Schale angebracht sind und auf einem Abrollhügel, der den Unterbau repräsentiert (Bild 31).

In den Querschnitt der Schale werden Hohlkörper integriert. Die Auswahl geeigneter Hohlkörper erfolgt ausschließlich für die Herstellung des Demonstrators. Marktübliche Hohlkörper, z. B. cobiax® Eco-Line, können aufgrund der skalierten Größe nicht verwendet werden. Die Ermittlung der Lage und Größe der anzuordnenden Hohlkörper wurde mithilfe der an der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Methode (vgl. Abschnitt 7.1.4) durchgeführt. Der Querschnitt wird mit mehreren Lagen Mikrobewehrung, d. h. Matten aus normalfestem Stahldraht mit einem Durchmesser von 1,0 mm bei einer Maschenweite von 12,7 mm, bewehrt. Die Mikrobewehrung dient hierbei nicht der Sicherstellung der geforderten Struktursteifigkeit, sondern stellt die Robustheit des Systems im Grenzzustand der Tragfähigkeit sicher. Des Weiteren können die Hohlkörper zwischen den Bewehrungslagen zur Lagesicherung eingefasst werden. Zur einfachen Sonnennachführung wird, ähnlich wie bei dem bereits bestehenden Demonstrator, ein Linearantrieb installiert. Zur Verifizierung der Geometrie und der damit einhergehenden optischen Wirksamkeit wird die Spiegelfläche

edge areas no longer have any optical effectiveness, i.e. the reflected radiation for these areas cannot be bundled onto the absorber tube. Nevertheless, the demonstrator has a global optical effectiveness of 94%.

9.2 Demonstrator with void formers

A large-scale demonstrator made of Nanodur® concrete was also planned in the second phase of the project, now with integrated void formers. However, this is still in production at the time of the final report. The 1.5 m long demonstrator corresponds to the shape of the module treated in section 4 with an aperture width of 10 m and was scaled by a factor of 0.3 due to production restrictions in the laboratory. The geometry and dimensions are shown in Fig. 30. The focal length, i.e. the distance from the apex of the mirror surface to the focal point of the parabolic geometry, is 894 mm. The parabolic trough is mounted on sickles, which are attached to the underside of the shell, and on a hill representing the substructure (Fig. 31).

Void formers are integrated into the cross-section of the shell. The selection of suitable ones is made only for the production of the demonstrator. Due to the scaled size, commercially available void formers, e.g. cobiax® Eco-Line, cannot be used. The determination of the position and size of the void formers to be arranged was carried out using the method developed at RUB (cf. Section 7.1.4). The cross-section is reinforced with several layers of micro-reinforcement, i.e.

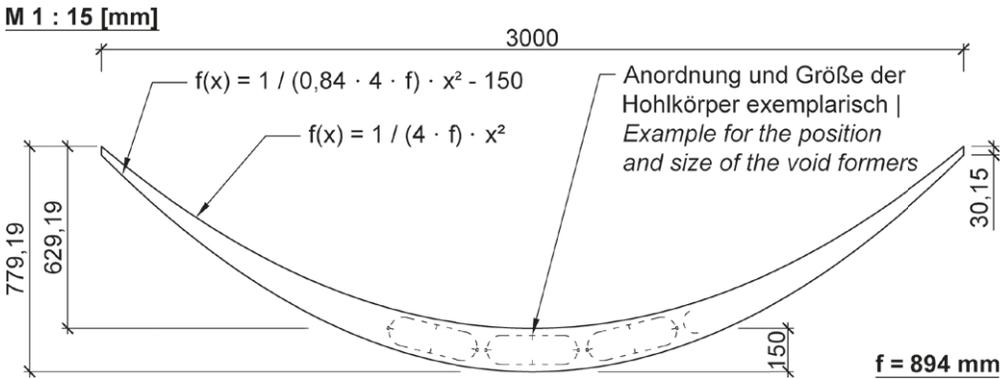


Bild 30: Abmessungen Demonstrator mit Hohlkörpern [mm] | Fig. 30: Dimensions of prototype with void formers [mm]

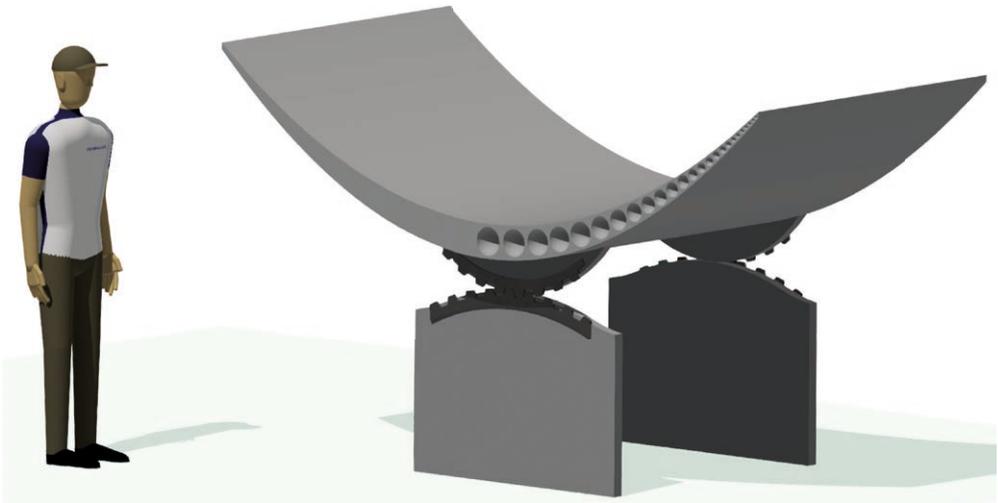


Bild 31: Computeranimation Demonstrator mit Hohlkörpern | Fig. 31: Computer animation of the prototype with void formers

abschließend mittels ATOS 3D-Scanner der Firma GOM Messtechnik vermessen und der Idealparabel gegenübergestellt.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt zielte auf die Entwicklung leichtgewichtiger und gleichzeitig verformungsarmer Schalenstrukturen am Beispiel von Parabolrinnenkollektoren für solarthermische Kraftwerke ab. Für die Entwicklung von Tragstrukturen wurden verschiedene Strukturkonzepte erarbeitet, welche sowohl die materialbedingten

meshes of normal-strength steel with a diameter of 1.0 mm and a mesh size of 12.7 mm. The micro-reinforcement does not serve to ensure the required structural stiffness, but ensures the robustness of the system in the ultimate limit state. Furthermore, the void formers can be enclosed between the reinforcement layers to secure the position. For simple sun tracking, a linear drive is installed, similar to the existing demonstrator. To verify the geometry and the associated optical effectiveness, the mirror surface is finally measured using an ATOS 3D scanner from GOM Messtechnik and compared with the ideal parabola.

Eigenschaften des im Rahmen des Projekts genutzten und auf den Anwendungsfall weiterentwickelten NANODUR®-Beton berücksichtigt, als auch die stark tragwerksbedingten Beanspruchungen, wie Eigenlasten, thermische Beanspruchungen und insbesondere auslenkungs- und anströmungsbedingte Windlasten, welche in Windkanaluntersuchungen – für die unterschiedlichen Geometrien der Förderphasen – abgeleitet wurden.

Die Herleitung geeigneter Strukturkonzepte ist eng verknüpft mit den forcierten Geometrieansprüchen bereits existierender Parabolrinnen-Kollektormodulen, sodass in erster Förderphase eine Optimierungsstrategie für die Abmessungen des *EuroTrough*-Moduls mit einer Apertur von $5,80 \times 12,00$ m entwickelt wurde. Diese basiert auf einer Formoptimierung mit vorgeschalteter Sensitivitätsanalyse und einer Erweiterung der numerischen Optimierung auf Ebene von analytischen Metamodellen. Begrenzt wurde der Optimierungsprozess durch materielle Randbedingungen, primär durch die zentrische Zugfestigkeit des Betons. Mithilfe eines hergeleiteten Wirksamkeitskriteriums auf Basis des Winkelfehlers der reflektierten Solarstrahlen konnte die Genauigkeit nachgewiesen werden, was der Zielsetzung einer leichten, verformungsarmen Schalenstruktur gerecht wird. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Optimierungsstrategien aus Förderphase I wurden in Förderphase II Hohlstrukturen für Kollektormodule mit großer Aperturweite abgeleitet. Dazu sind Methoden auf Basis topologischer Optimierung zur inneren Strukturfindung entwickelt worden, um sowohl zentral im Querschnitt verlaufende, steifigkeitsspezifische Rippenverstärkungen als auch Hohlkörperverteilungen zu generieren. Robuste Dichtelayouts wurden durch Berücksichtigung mehrerer Lastfälle erzeugt. Mit der umfangreichen Datenbasis aus Windkanaluntersuchungen konnten Streuungen der Schalenbeanspruchungen simuliert und aufgezeigt werden.

In experimentellen Untersuchungen wurde der NANODUR®-Beton weiterentwickelt, indem durch Zugabe von Erhärtungsbeschleunigern und Verfeinerung der Rezeptur oder auch durch

10 Summary and outlook

The project aimed at the development of lightweight and simultaneously low-deformation shell structures using the example of parabolic trough collectors for solar thermal power plants. Various structural concepts were developed for the design of supporting structures, which take into account both the material-related properties of NANODUR® concrete, which is used within the framework of the project and enhanced for this specific application, as well as specific action effects, such as dead loads, temperature constraints and, in particular, wind loads, which were derived in wind tunnel tests – for the different geometries of the funding phases – and strongly depend on the wind flow direction and rotation of the collector.

The derivation of structural concepts is strictly related to the forced geometrical demands of already existing parabolic trough collector modules, so that an optimisation strategy for the dimensions of the *EuroTrough* module with an aperture of 5.80×12.00 m was developed in the first funding phase. It is based on a shape optimization with preliminary sensitivity analysis and an extension of the numerical optimisation on the level of analytical metamodells. The optimisation process was limited by material restrictions, primarily by the axial tensile strength of the concrete. By means of a derived accuracy criterion based on the slope error of the reflected solar rays, the efficiency could be proven with respect to the objective of a light, low-deformation shell structure. Based on the findings and optimisation strategies from funding phase I, hollow core structures for collector modules with large aperture width were derived in funding phase II. Therefore, methods based on topology optimisation have been developed for the inner form finding in order to generate stiffness-orientated ribs as well as void former distributions. Robust density distributions were generated by considering several load cases. With the comprehensive database from wind tunnel tests it was possible to simulate and demonstrate the variation of the loads.

Wärmebehandlung im jungen Betonalter bereits hohe Festigkeiten erzielt werden konnten. Dies wirkt sich günstig auf eine prozessorientierte, serielle Fertigung aus, bei simultanem Erhalt der einfachen Verarbeitbarkeit des Betons. Ein kleinformatiger Demonstrator mit nur 2 bis 3 cm Wandstärke verdeutlicht die praktische Umsetzung.

Die entwickelten Methoden wurden am Beispiel von Parabolschalen hergeleitet und an diesen numerisch sowie experimentell verifiziert. Dennoch lassen sie sich allgemein auf Tragstrukturen des klassischen Ingenieurbaus übertragen. Insbesondere der Fertigteilebau kann stark profitieren, indem mithilfe von Hochleistungsbetonen leichte Bauteile mit hoher Steifigkeit und Robustheit etabliert werden. Aber auch Scheiben-, Platten- und andere Schalenträgerwerke können mithilfe der hier vorgestellten Methoden entworfen, bemessen und hergestellt werden, sodass sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten erschließen.

Dank

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des DFG-SPP 1542 (Projektnummer 198176582). Dem Institut für Strömungsmechanik der Ruhr-Universität Bochum, insbesondere Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer, sei für die Unterstützung bei den Windkanaluntersuchungen gedankt. Ein besonderer Dank geht an das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), insbesondere Dipl.-Ing. Klaus Hennecke, für die technische Beratung. Der Firma Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden wird für die umfangreiche Unterstützung mit dem Bindemittel Nanodur® Compound 5941 gedankt. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang der durcrete GmbH, im Speziellen Herrn Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister, für die fachliche Unterstützung bei der Anwendung von Nanodur®-Beton. Für die Bereitstellung der Hohlkörper sei Herrn Dr.-Ing. Karsten Pfeffer der Heinze Cobiax Deutschland GmbH recht herzlich gedankt.

In experimental tests, NANODUR® concrete was enhanced by adding hardening accelerators and improving the concrete mixture or by heat treatment in order to achieve high strengths at a young concrete age. This has a positive effect on process-oriented, serial production while simultaneously maintaining the good workability of the concrete. A small-scale demonstrator with a thickness of only 2 to 3 cm shows the practical realisation.

The developed methods were derived from the example of parabolic shells and verified numerically and experimentally. Nevertheless, they can generally be applied to supporting structures of traditional civil engineering. In particular, prefabricated construction can benefit greatly by using high-performance concretes to establish lightweight components with high rigidity and robustness. However, the methods presented here can also be used to design, dimension and manufacture slabs, plates and other shell structures, thus opening up a wide range of possible applications.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for the financial support of this project no. 198176582 in the framework of the DFG Priority Programme SPP 1542. Special thanks go to the Institute of Wind Engineering and Flow Mechanics of RUB, especially Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer, for the support during the wind tunnel tests, and the German Aerospace Center (DLR), especially Dipl.-Ing. Klaus Hennecke, for technical advice. We would like to thank the company Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden for the support with the binder Nanodur® Compound 5941. Special thanks in this context go to durcrete GmbH, especially Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister for the technical support in the usage of Nanodur® concrete. We would like to thank Dr.-Ing. Karsten Pfeffer of Heinze Cobiax Deutschland GmbH for providing the void formers.

Literatur | References

- [1] Pitz-Paal, R.; Elsner, P.: Solarthermische Kraftwerke – Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. In: acatech/Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina/Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München/Halle/Mainz, 2015
- [2] Quasching, V.: Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Simulation. Carl Hanser, 2011
- [3] Schabbach, T.; Leibbrandt, P.: Solarthermie – Wie Sonne zu Wärme wird. Berlin: Springer, 2014
- [4] Stieglitz, R.; Heinzel, V.: Thermische Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin: Springer, 2012
- [5] Lüpfer, E.; Pottler, K.; Schiel, W.: Optimization of cost and efficiency in concentrating solar power technology through quality control in large production series for solar fields. In: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. – DGS, PSE GmbH (Hrsg.): Proc. of the ISES – EuroSun Congress, 20.–23.06.2004 in Freiburg, Freiburg: PSE GmbH, 2004, S. 1-911–1-917
- [6] Lüpfer, E.; Geyer, M.; Schiel, W.; Esteban, A.; Osuna, R.; Zarza, E.; Nava, P.: Eurotrough Design Issues and Prototype Testing at PSA. In: Campbell-Howe, R. (Hrsg.): Proc. of the ASME Int. Solar Energy Conf. – Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, 21.–25.04.2001 in Washington, DC (USA), 2001, 5 S.
- [7] Schiel, W.: Kollektorentwicklung für solare Parabolrinnenkraftwerke. Bautechnik 89 (2012) 3, S. 182–191
- [8] Riffelmann, K.-J.; Richert, T.; Nava, P.; Schweitzer, A.: Ultimate Trough – A significant step towards cost competitive CSP. Energy Procedia 49 (2014) – Proc. of the 19th SolarPACES Conf., 17.–20.09.2013 in Las Vegas (USA), 2013, S. 1831–1839
- [9] Marcotte, P.; Manning, K.: Development of an advanced large-aperture parabolic trough collector. Energy Procedia 49 (2014) – Proc. of the 19th SolarPACES Conf., 17.–20.09.2013 in Las Vegas (USA), 2013, S. 145–154
- [10] Pedretti, A.: A 3 MW thermal concentrated solar power pilot plant in Morocco with the Airlight Energy Technology. In: Proc. of 18th SolarPACES Conf., 11.–14.09.2012 in Marrakesh (Marokko), 2012
- [11] Bendt, P.; Rabl, A.; Gaul, H. W.; Reed, K. A.: Optical Analysis and Optimization of Line Focus Solar Collectors. SERI/TR-34-092, Solar Energy Research Institute, Golden (Colorado, USA), 1979
- [12] Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolschalen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungs-beton. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 2016
- [13] Weissbach, R.: Die abrollende Parabolspiegelrinne. Schutzrecht DE102011011805 A1. Industrial property right (23.08.2012)
- [14] Hennicke, J.; Matsushita, K.; Otto, F.; Sataka, K.; Schaur, E.; Shirayanagi, T.; Gröbner, G.: Gitterschalen | Grid Shells. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL), IL 10, Universität Stuttgart, 1974
- [15] Isler, H.: Typologie und Technik moderner Schalen. Werk, Bauen + Wohnen 38 (1983) 12, S. 34–41
- [16] Schnellenbach-Held, M.; Pfeffer, K.: Tragverhalten zweiachsiger Hohlkörperdecken. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001) 9, S. 573–578
- [17] Abramski, M.; Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahlbetondecken mit kugelförmigen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 6, S. 349–361
- [18] Albrecht, C.; Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Bemessung und Konstruktion von zweiachsig gespannten Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 9, S. 590–600
- [19] Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. J. IASS 58 (2017) 1/191, S. 105–119
- [20] Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolschalen aus Hochleistungs-beton als Solarkollektoren. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 851–861
- [21] Chopradub, A.: Zur Tragfähigkeit von punktförmig gestützten filigranen Fassadenplatten aus faserverstärktem Feinkornbeton. Diss., TU Kaiserslautern, 2010
- [22] Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 752–762
- [23] Forman, P.; Kämper, C.; Mark, P.; Schnell, J.: Parabolschalen als Unterkonstruktionen für Solarkollektoren. In: Ing. Ges. Niemann & Partner GbR (Hrsg.): Einwirkungen auf Ingenieurtragwerke und Sicherheitskonzepte – Festschrift Prof. Niemann, Bochum, 2015, S. 77–92
- [24] Forman, P.; Müller, S.; Ahrens, M. A.; Schnell, J.; Mark, P.; Höffer, R.; Hennecke, K.; Krüger, J.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. Solar Energy 111 (2015), S. 364–377
- [25] Forman, P.; Müller S.: Verformungsoptimierte Parabolrinnenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Tagungsband des 54. Forschungskolloquiums des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), 07./08.11.2013 in Bochum, 2013, S. 15–22
- [26] Oya, J.; Kalender-Wevers, C.; Winkelmann, U.; Höffer, R.: Experimental and numerical investigation of the dust transport on the reflector panels of a parabolic trough power plant. In: Proc. of the European-African Conf. on Wind Engineering EACWE 2013, 07.–11.07.2013 in Cambridge (Großbritannien), 2013

- [27] Winkelmann, U.; Kämper, C.; Höffer, R.; Mark, P.: Wind tunnel experiments and numerical analysis on large-scale parabolic shells for solar trough collector modules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146 (2020), S. 2390–2407 – <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.057>
- [28] Cook, N. J.: *The designers guide to wind loading of building structures – part 2: Static structures*. London, Oxford: Butterworths, 1990
- [29] Taylor, G. I.: *The spectrum of turbulence*. Proc. of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 164 (1938) 919, S. 476–490
- [30] Hosoya, N.; Peterka, J. A.; Gee, R. C.; Kearney, D.: *Wind tunnel tests of parabolic trough solar collectors*. Subcontract Report NREL/SR-550-32282, National Renewable Energy Laboratory, 2008
- [31] Mangerig, I.: *Klimatische Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Stahlverbundbrücken*. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 1986 – erschienen in: *Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-4*
- [32] Sanio, D.; Mark, P.; Ahrens, M. A.: *Temperaturfeldberechnung für Brücken: Umsetzung mit Tabellenkalkulationen*. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 2, S. 85–95 – DOI: 10.1002/best.201600068
- [33] DIN EN 1991-1-5:2010-12: Eurocode 1: *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen*; Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC:2009.
- [34] Yamazaki, F.; Shinozuka, M.; Dasgupta, G.: *Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis*. *Journal of Engineering Mechanics* 114 (1998) 8, S. 1335–1354
- [35] Arbeitskreis „Tübingdesign“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB): *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen – Maschineller Tunnelbau*. In: *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Tunnelbautaschenbuch*, Berlin: Ernst und Sohn, 2014, S. 17–121
- [36] Sagmeister, B.: *Maschinenteile aus zementgebundenem Beton*. Berlin: Beuth, 2017
- [37] Bažant, Z. (Hrsg.): *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. John Wiley and Sons Ltd., 1988
- [38] Most, T.; Will, J.: *Metamodel of Optimal Prognosis – An automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection*. In: *Proc. of the Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0, 20./21.11.2008 in Weimar*, 2008, 21 S. – DOI: 10.13140/2.1.2194.4007
- [39] Kämper, C.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: *Hollow Core Concrete Shells for Large Aperture Parabolic Troughs*. In: *Hordijk, D. A.; Lukovic, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proc. of the 2017 fib Symp., 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande)*, 2017, S. 1119–1127
- [40] Hartung, D.; Sickinger, C.; Herbeck, L.; Kueppers, P.: *Homogenisierung einer Hohlkörperflächenstruktur*. In: *DGLR (Hrsg.): Proc. zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2002*, 24.09.2002 in Stuttgart, 2002, 10 S.
- [41] Wiedemann, J.: *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*. 3. Aufl., Springer, 2007
- [42] Bendsoe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2004
- [43] Andreassen, E.; Clausen, A.; Schevenels, M.; Lazarov, B.; Sigmund, O.: *Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 43 (2011), S. 1–16
- [44] Mindlin, R. D.: *Influence of rotary inertia and shear of flexural motion of isotropic elastic plates*, *J. Appl. Mech.* 18 (1951), S. 31–38
- [45] Kämper, C.; Forman, P.; Mark, P.: *Entwurf topologisch optimierter Schalentragwerke*. In: *Pahn, M.; Thiele, C.; Glock, C. (Hrsg.): Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, Kaiserslautern, 2018, S. 675–692
- [46] Dyckerhoff AG: *Dyckerhoff NANODUR Compound 5941*. Product data sheet, 2016
- [47] Albrecht, C.: *Bemessung von Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern und ein Beitrag zum besseren Verständnis der Querkrafttragfähigkeit*. Diss., TU Kaiserslautern, 2014
- [48] Pfeffer, K.: *Untersuchungen zum Biege- und Durchstanzenverhalten von zweiachsigen Hohlkörperdecken*. In: *Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 4, Nr. 178*, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [49] Aldejohann, M.: *Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung*. Diss., Universität Duisburg-Essen, 2008
- [50] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [51] Müller, S.: *Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke*. Diss., TU Kaiserslautern, 2016
- [52] DIN EN 12390-3:2009-07: *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*; Dt. Fassung EN 12390-3:2009.
- [53] DIN EN 196-1:2016-11: *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*; Deutsche Fassung EN 196-1:2016.
- [54] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb, Hrsg.): Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*. Erschienen in: *Schriftenreihe des DAfStb, Heft 600*, Berlin Wien Zürich: Beuth, 2012
- [55] *Zulassung Z-15.1-307: Hohlkörperperdecke System "COBIAX SLIM-LINE"*. DIBt, Berlin, 27.02.2013
- [56] *Zulassung Z-15.1-282: Hohlkörperperdecke System "COBIAX"*. DIBt, Berlin, 01.03.2015
- [57] Görtz, S.: *Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton*. Diss., RWTH Aachen, 2004

[58] Hennecke, K.; Krüger, D.; Dokupil, M.: Test of a Parabolic Trough System for Process Heat in a Climate with Low Direct Radiation. In: Sayigh, A. A. M. (Hrsg.): Proc. of the World Renewable Energy Congress VI – Renewables: The Energy for the 21st Century, 01.–07.07.2000 in Brighton (UK), 2000, S. 994–997 – <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50200-2>

[59] Pottler, K.; Lüpfer, E.; Johnston, G. H. G.; Shortis, M. R.: Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components, Journal of Solar Energy Engineering 127 (2005) 1, S. 94–101

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Fig. 1, 6, 7, 8+9 (rechts | right), 10, 13–19: Christoph Kämper
- Bilder | Fig. 2–4, 8+9 (links | left), 11, 12, 27, 29: Patrick Forman
- Bilder | Fig. 5, 21, 22 (Foto | photo), 23–26, 30, 31: Tobias Stallmann
- Bild | Fig. 20: Christian Albrecht [18], mod.
- Bild | Fig. 22 (Grafik | graphic): Heinze Cobiach Deutschland GmbH
- Bild | Fig. 28: Thomas Brenner

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke | Light, microreinforced UHPC shell structures optimised to deformations using the example of parabolic trough collectors in concentrating solar power plants

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark Lehrstuhlinhaber Chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	MA 2074/5-1/2 (Projektnummer Project number: 198176582)
Adresse Address:	Ruhr-Universität Bochum (RUB), Lehrstuhl für Massivbau, Universitätsstraße 150, Gebäude IC 5 – 179, 44780 Bochum
Kontakt Contact:	+49 234 32 25980 massivbau@rub.de www.kib1.ruhr-uni-bochum.de
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell Leiter Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion Head of Department Concrete Structures and Structural Design
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SCHN 771/7-1/2 (Projektnummer Project number: 198176582)
Adresse Address:	Technische Universität 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 www.massivbau-kl.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 07/2011–06/2014 Förderphase II Funding period II: 10/2014–09/2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2018
Team Team:	Patrick Forman (RUB, 07/2011–10/2014) Christoph Kämper (RUB, ab since 10/2014) Sören Müller (TU KL, 07/2011–10/2014) Tobias Stallmann (TU KL, ab since 08/2015) Janna Kruppenacker (TU KL, 10/2014–08/2015)
Partner Partners:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Solarforschung, Linienfokussierende Systeme, Köln Solarlite CSP Technology GmbH, Duckwitz Heinze Cobiach Deutschland GmbH, Wiesbaden Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden durcrete GmbH, Limburg an der Lahn

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Forman, P.; Müller, S.: Shape-optimised Parabolic Trough Collectors made of micro reinforced Ultra High Performance Concrete. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.) Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.-25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 297–302
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Collectors for solar parabolic trough power plants made of micro reinforced Ultra High Performance Concrete. In: Uzoegbo, H. C.; Schmidt, W. (Hrsg.): Proc. of the Int. Conf. on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA 2013), 28.-30.01.2013 in Johannesburg (Südafrika), 2013, S. 491–498, publ. on CD-ROM
- Forman, P.; Müller S.: Verformungsoptimierte Parabolinnenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Tagungsband des 54. Forschungskolloquiums des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), 07./08.11.2013 in Bochum, 2013, S. 15–22
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 752–762
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Innovative concrete parabolic trough collectors for solar power plants as an example for concrete in mechanical engineering. In: Proc. of the 1st Concrete Innovation Conf. (CIC), 11.-13.06.2014 in Oslo (Norwegen), 2014, 8 S. (flash drive)
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Concrete collectors for parabolic trough solar power plants. In: Bastien, J.; Rouleau, N.; Fiset, M.; Thomassin, M. (Hrsg.): Proc. of the 10th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.07.2014 in Quebec City (Kanada), Québec: Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB), Université Laval, 2014, S. 309–314
- Müller, S.; Schnell, J.: Parabolrinnen für solarthermische Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 94–101 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171407>
- Forman, P.; Mark, P.: Numerische Simulation und Optimierungsstrategien für Betonschalen von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 242–253 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171546>
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Kollektorelemente solarthermischer Kraftwerke aus innovativen hochfesten Betonfertigteilen. BetonWerk International (2014) 5, S. 182–188 – <http://www.cpi-worldwide.com/de/journals/artikel/36767>
- Forman, P.; Müller, S.; Mark, P.; Schnell, J.: Design, detailing and future potential of high-strength concrete collector modules for parabolic troughs. ALITinform International Analytical Review 36 (2014) 4–5, S. 48–58
- Schnell, J.; Kämper, C.; Krummenacker, J.; Mark, P.: Design of light-weight, large-scale Parabolic Troughs made of high-strength Concrete. In: Proc. of the 11th Central European Congress on Concrete Engineering, 01.10.2015 in Hainburg (Österreich), 2015, S. 18–21
- Forman, P.; Müller, S.; Ahrens, M. A.; Schnell, J.; Mark, P.; Höffer, R.; Hennecke, K.; Krüger, J.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. Solar Energy 111 (2015), S. 364–377 – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14005349>
- Kämper, C.; Krummenacker, J.; Forman, P.; Mark, P.; Schnell, J.: Slender large-scale parabolic troughs using shape-optimized hollow structures made of high-strength concrete. In: Papadrakakis, M.; Papadopoulos, V.; Plevris, V. (Hrsg.): Proc. of the 5th Int. Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2015), ECCOMAS Thematic Conf., 25.–27.05.2015 in Kreta (Griechenland), 2015, 8 S.
- Kämper, C.; Krummenacker, J.; Forman, P.; Mark, P.; Schnell, J.: Lightweight thin-walled shell structures made of high-strength concrete for parabolic trough collectors. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), paper No. IASS2015-504012, 10 S. (flash drive)
- Forman, P.; Kämper, C.; Mark, P.; Schnell, J.: Parabolschalen als Unterkonstruktionen für Solarkollektoren. In: Ing. Ges. Niemann & Partner GbR (Hrsg.): Einwirkungen auf Ingenieurtragwerke und Sicherheitskonzepte – Festschrift Prof. Niemann, Bochum, 2015, S. 77–92
- Smarslik, M.; Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: Topologische Optimierung von Betonstrukturen. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 234–255

- Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolshalen aus Hochleistungsbeton als Solar-kollektoren. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051
- Stallmann, T.; Kämper, C.; Schnell, J.; Mark, P.: Design of light-weight, slender parabolic troughs made of high-strength concrete. In: Middendorf, B.; Fehling, E. (Hrsg.): *Proc. 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – HiPerMat 2016*, 11.03.2016 in Kassel, 2016, 9 S. (flash drive)
- Kämper, C.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: Hollow Core Concrete Shells for Large Aperture Parabolic Troughs. In: Hordijk, D. A.; Lukovic, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proc. of the 2017 fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), 2017, S. 1119–1127 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_130
- Stallmann, T.; Forman, P.; Kämper, C.; Schnell, J.; Mark, P.: Development and Construction of Light-Weight Parabolic Troughs made of High-Performance-Concrete. In: Abramski, M.; Korzeniowski, P. (Hrsg.): *Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures*, 19.06.2017 in Gdansk (Polen), 2017, S. 123–133
- Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. *J. IASS* 58 (2017) 1/191, S. 105–119 – <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.843>
- Kämper, C.; Forman, P.; Mark, P.: Entwurf topologisch optimierter Schalentragerwerke. In: Pahn, M.; Thiele, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, Kaiserslautern, 2018, S. 675–692
- Winkelmann, U.; Kämper, C.; Höffer, R.; Mark, P.: Wind tunnel experiments and numerical analysis on large-scale parabolic shells for solar trough collector modules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146 (2020), S. 2390–2407 – <https://doi.org/10.1016/j.jrenene.2019.08.057>

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Müller, S.: Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke. TU KL, 2016 – <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/4362>
- Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolshalen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungsbeton. RUB, 2016 – <http://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/5132>
- Stallmann, T.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Hohlkörperdecken aus Hochleistungs-Feinkornbeton. TU KL, 2020 – urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-60767
- Kämper, C.: Entwurf gewichtsminimierter Flächentragerwerke aus Hochleistungsbeton. RUB, 2022

Studienarbeiten | Student's research projects (alle | all RUB)

- Kremer, K.: Optimierungsstrategien für Strukturen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien am Beispiel einfacher Tragwerke. Bachelorarbeit, 2012
- Vasilev, G.: Strukturoptimierung einer Parabolrinnenschale aus UHPC auf Querschnittsebene. Bachelorarbeit, 2013
- Tscheplanski, K.: Versuchsbiertierte Ermittlung von Druckbeiwerten für die statische Bemessung von Parabolrinnen. Masterarbeit, 2014
- Pouyafar, T.: Experimentelle Ermittlung von windinduzierten Oberflächendrücken zur statischen und dynamischen Analyse von großformatigen Parabolrinnenmodulen. Masterarbeit, 2016.
- Reimann, P.: Entwicklung parametrisierter Simulationsmodelle zur numerischen Analyse gekrümmter Tragstrukturen aus Hochleistungsbeton für Kollektormodule von Parabolrinnen großer Aperturweiten. Masterarbeit, 2016
- Uszball, S.: Topologische Optimierung von Endschotten zur Lagerung von Kollektormodulen aus Hochleistungsbeton für Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Bachelorarbeit, 2016
- Grünig, F.: Entwicklung eines Software-Interfaces zur Kopplung der kommerziellen Programme Matlab und Ansys für die topologische Optimierung geometrisch beliebiger Strukturelemente. Masterarbeit, 2017

Patent | Patent

- Weissbach, R.: Die abrollende Parabolspiegelrinne. Schutzrecht DE102011011805 A1, Industrial property right (23.08.2012)

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Auslegung von Parabolrinnen Typ EuroTrough für Solarkraftwerke im Originalmaßstab | Designing of parabolic troughs type EuroTrough in full-scale as a concrete construction for solar power plants

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	03/2015–06/2018

- 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 Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	01/2018–06/2020

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des 1. Arbeitstreffens des SPP 1542, Kurhaus Trifels, Anweiler-Bindersbach, 14./15.11.2011 | Organization of the 1st Annual Meeting of SPP 1542, Kurhaus Trifels, Anweiler-Bindersbach, 14./15.11.2011
- Organisation des 5. Arbeitstreffens des SPP 1542, Ruhr-Universität Bochum, 07.–09.10.2015 | Organization of the 5th Annual Meeting of SPP 1542, Ruhr University Bochum, 07.–09.10.2015
- Workshop „Praktische Formfindung“ mit Prof. Adriaenssens, 08.10.2015 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Practical Form Finding Techniques” with Prof. Adriaenssens, 08.10.2015 at Ruhr University Bochum
- Workshop „(Struktur-)Optimierung“ mit Prof. Hartmann, Prof. Bletzinger und Prof. Bucher, 06.09.2013 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Structural Optimization” with Prof. Hartmann, Prof. Bletzinger and Prof. Bucher, 06.09.2013 at Ruhr University Bochum
- Workshop „Windlasten auf Parabolrinnen“ mit Prof. Höffer, 17.11.2017 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Wind Loads on Parabolic Troughs” with Prof. Höffer, 17.11.2017 at Ruhr University Bochum