



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Numerische Simulation und Optimierungsstrategien für Betonschalen von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke

Patrick Forman
Peter Mark

Lehrstuhl für
Massivbau,
Ruhr-Universität
Bochum

Parabolrinnenkraftwerke gehören zu den wirtschaftlichsten Varianten der solarthermischen Kraftwerke. Bisher bestehen diese aus Stahlfachwerken mit aufgelagerten Spiegelementen zur Strahlenkonzentration. Diese Trennung von Trag- und Reflektorstruktur soll durch eine Schalenstruktur aus (ultra-)hochfestem Beton aufgehoben werden. Dazu sind numerische Modelle entwickelt sowie spezifische Beanspruchungen und geometrische und materielle Restriktionen hergeleitet worden. Ein mehrstufiger Optimierungsprozess bildet den Grundstein für ein form- und herstellungsoptimiertes Schalentragwerk. Ein hergeleitetes Kriterium zur Strahlenkonzentration bewertet die Wirksamkeit. Die Projektpartner an der TU Kaiserslautern haben unter Leitung von Prof. Schnell die experimentelle Entwicklung betrieben und zu einem Großdemonstrator umgesetzt.

1 Einleitung

Durch einen weltweit kontinuierlich steigenden Energiebedarf und eine gleichzeitige Abkehr von der Atomenergie für zivile Nutzung rücken regenerative Energiequellen vermehrt in den Fokus, um die entstehenden Bedarfslücken zu füllen, aber auch um fossile Ressourcen zu schonen. Insbesondere die Solarthermie dient hierbei als – nach menschlichem Ermessen – unerschöpfliche Energiequelle. Nach dem Prinzip der Lupe wird die direkte, solare Strahlung gebündelt und in thermische Energie umgewandelt. Die zurzeit kommerziell meistgenutzten Systeme sind Parabolrinnenkollektoren, die bisher aus feingliedrigen Stahlfachwerken mit aufgelagerten Spiegelementen bestehen, wodurch die Solarstrahlung auf ein im Fokuspunkt angeordnetes Absorberrohr gebündelt wird. Das kommerziell meistgenutzte Modul ist hierbei der *EuroTrough* [1] mit einer Apertur – das ist die sonnenwirksame Fläche eines Kollektors – von $12,00 \times 5,77 \text{ m}^2$. Zu mehreren Kollektorreihen mit bis zu 150 m Länge zusammengefasst, besitzen die Solarkraftwerke *Andasol 1–3* eine Leistung von je 50 MW [2]. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zielen bisherige Entwicklungen darauf ab, die Apertur zu vergrößern und somit den optischen Wirkungsgrad über einen erhöhten Konzentrationsgrad – das ist das Verhältnis von reflektierter zu absorbierter Strahlung – zu steigern [3]. Die in diesem Projekt verfolgte Strategie setzt hingegen auf die Zusammenführung von Trag- und Reflektorstruktur zu einer verformungsarmen Schalenkonstruktion aus (Ultra-)Hochleistungs Beton, wobei hohe Anforderungen an die Güte der Schalenoberfläche gestellt werden, die gleichzeitig als Substrat für die zu applizierenden Reflektorelemente dient.

2 Numerische Modellierung und Restriktionen

Ausgehend vom aktuellen Stand der Technik wurde das Modell *EuroTrough* als Startkonfiguration für die numerischen Untersuchungen als geometrisches Vorbild gewählt. Zusätzlich orientierte sich eine weitere konzeptionelle Umsetzung an dem Modul IST-PT 1 [4], welches bereits auf dem Prüfstand SOPRAN des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln auf seine Leistungsfähigkeit getestet worden ist. Auf dieser Basis wurde von den Projektpartnern an der TU Kaiserslautern ein Großdemonstrator gebaut. Dieser besitzt eine Apertur von $3,20 \times 2,205 \text{ m}^2$. Die wesentlichen geometrischen Daten beider Konzepte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

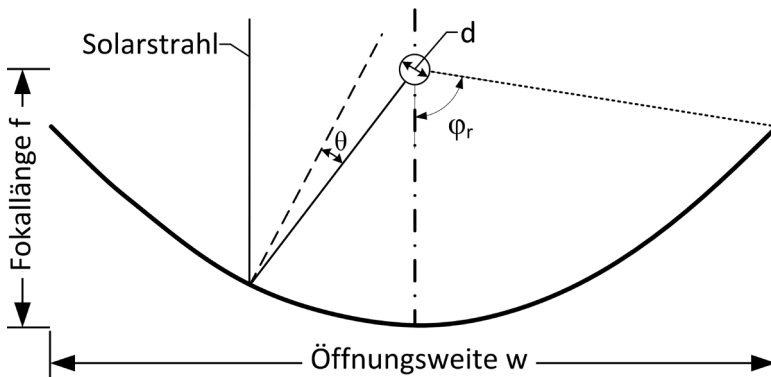


Bild 1: Geometrischer Aufbau eines Parabolsegments

Tabelle 1: Geometrische Daten der Parabolrinnenkonzepte, Bezeichnungen nach Bild 1

	Modell EuroTrough	Großdemonstrator (TU Kaiserslautern)
Kollektorlänge [m]	12,00	3,20
Öffnungsweite [m]	5,77	2,205
Fokallänge f [m]	1,71	0,78
Öffnungswinkel ϕ_r [°]	80	70
Absorberrohrdurchmesser d [mm]	70	51
Konzentrationsgrad $C = w/d$ [-]	82	43

Zur Vorhersage der Verformungen und Spannungen wurden für beide Konzepte modulare, parametrisierte Finite-Elemente-Modelle entwickelt, die hauptsächlich aus 8-knotigen, kontinuumsbasierten Schalenelementen bestehen, um die Dickenvariation auf die Schalenunterseite auszulagern und somit die zu verspiegelnden Schaleninnenflächen unverzerrt wiederzugeben. Diese Basismodelle unterscheiden sich in ihrem konzeptuellen Aufbau. Das Modell des Großdemonstrators besteht aus einer über den Querschnitt veränderlichen Dicke mit Randversteifungen und besitzt als Besonderheit eine patentrechtlich geschützte, linienartige Rolllagerung. Diese Geometrie besitzt den Vorteil einer zeitnahen Umsetzung zu einem Prototyp, um die prinzipielle Leistungsfähigkeit von Betonschalen zu demonstrieren. Der großformatige Kollektor nach geometrischem Vorbild des EuroTrough ist im Schalenschwerpunkt, welcher simultan als Drehachse dient, gelagert und ist nach dem Vorbild von Tonnenschalen durch Seitenschotte und Randsteifen verstärkt. Um hohen Verwölbungen entgegenzuwirken, sind zusätzlich Zugbänder angeordnet. Dieses Modell dient als Basis der numerischen Untersuchungen und Optimierungsstrategien zu einer dem Kraftfluss folgenden Schalenkonstruktion.

Restriktionen erfolgen auf materieller Ebene neben Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul u. a. hauptsächlich aus der Zugfestigkeit des Betons (Tabelle 2). Auf geometrischer Ebene resultieren Restriktionen aus einer Minimierung der Verformungen, so dass die Solarstrahlen aus der vollständigen Spiegelfläche auf das Absorberrohr zur Energiegewinnung umgelenkt werden. So ist für den Betriebszustand ein Verbleib der Schalenstruktur im Zustand I rechnerisch sicherzustellen. Folglich ist eine numerische Untersuchung mit linear-elastischem Materialmodell (materiell linear) hinreichend genau.

Bild 2:
Modulare,
parametrisierte FE-
Schalenmodelle

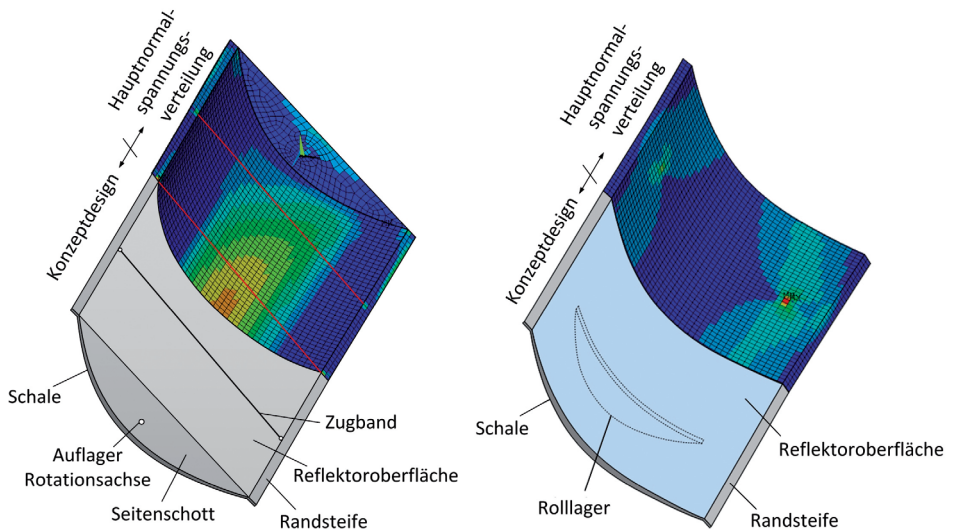


Tabelle 2: Mittelwerte der Festbetoneigenschaften (an der TU Kaiserslautern ermittelt)

Elastizitätsmodul	47 600 N/mm ²
Biegezugfestigkeit	15 N/mm ²
Zylinderdruckfestigkeit	109 N/mm ²
Dichte	2 524 kg/m ³

3 Spezifische Einwirkungen und initiale Formabweichungen

Parabolrinnenkollektoren werden im Tagesverlauf der Sonne nachgeführt, wodurch sich eine Vielzahl von Beanspruchungsszenarien einstellt. Besonders sind dadurch Beanspruchungen aus Eigenlasten und durch die auslenkungsabhängige Windanströmung beeinflusst. Aber auch Temperatureinwirkungen und zeitabhängige Kriech- und Schwindprozesse müssen berücksichtigt werden sowie ungewollte, initiale Vorverformungen aus dem Herstellungsprozess.

3.1 Experimentell ermittelte Formbeiwerte für Windbeanspruchungen

Für die sehr bauteilspezifischen, quasi-statischen Beanspruchungen müssen die stark von der Interaktion von Bauteil und Windanströmungsfeld abhängigen Windbeanspruchungen über auslenkungsbedingte Formbeiwerte auf die Parabelfläche definiert werden. In der Literatur (u. a. [5]) sind diese jedoch fast ausschließlich als globale Mittel- bzw. Extremwerte der jeweiligen Anströmungsrichtung hergeleitet und nur für unzureichende Ausnahmefälle als flächige Beanspruchungsbereiche gegeben. Am Lehrstuhl für Windingenieurwesen und Strömungsmechanik der Ruhr-Universität Bochum sind daher an einem mittels 3D-Plot hergestellten Rapid-Prototype-Modell (Bild 3) Untersuchungen an einem Einzelkollektor für eine frontale Anströmung und verschiedene Kollektorauslenkungen durchgeführt und ausgewertet worden [6, 7]. Aus Symmetriegründen sind die Druckmesspunkte des Modells für Vorder- und

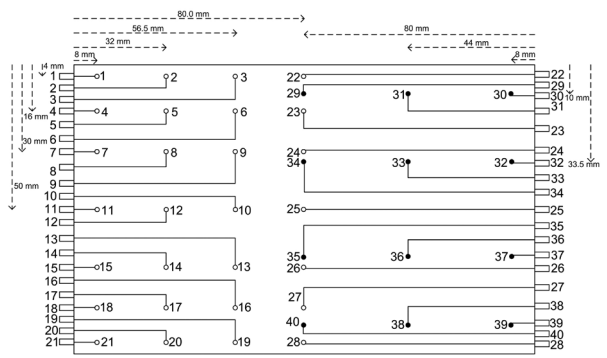
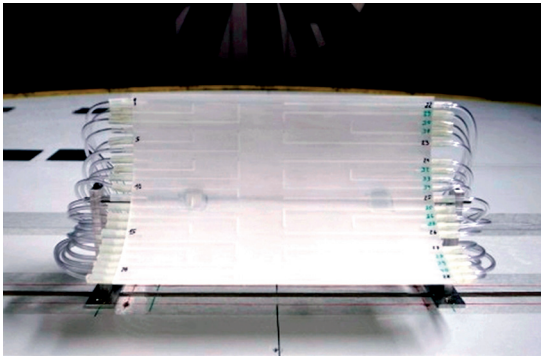


Bild 3: Rapid-Prototype-Modell im Windkanal der Ruhr-Universität Bochum und Anordnung der Druckmesspunkte auf dem Modell

Rückseite versetzt auf getrennten Seiten angeordnet, sodass nur für die vertikale Modellhalbierende vergleichbare Druckdifferenzen ausgewertet werden können und flächige, unsymmetrische Belastungen aus Druckspitzen in Randbereichen keine Berücksichtigung finden. Aufgrund der Anordnung einzelner Parabolrinnenmodule zu Kollektorreihen ist ein über die Länge konstanter Ansatz der Windlasten hinreichend genau bzw. können sie auch als konservativ angesehen werden, wenn die verschattenden Auswirkungen der äußeren Kollektorreihen auf die inneren Module berücksichtigt werden.

Aus den so ermittelten, zeitlichen Druckdifferenzen des Windanregungsspektrums sind unter Anwendung einer Zeitreihenanalyse und Extremwertstatistik nach der Methode von Cook [8] Formbeiwerte generiert worden, die einer 50-jährigen Wiederkehrperiode genügen und mit dem zeitlich gemittelten Böenstaudruck zu charakteristischen, quasi-ständigen Einwirkungen aus Windbeanspruchung führen. Im Vergleich mit [5] – an einem Modell ähnlich dem im Windkanal der Ruhr-Universität Bochum getesteten – liefern diese für resultierende Reaktionskräfte eine gute Übereinstimmung. Ausgewertet wurden die Verläufe der Formbeiwerte über die Öffnungsweite für Anströmrichtungen von 0°, 45°, 90° und 135° (Bild 4).

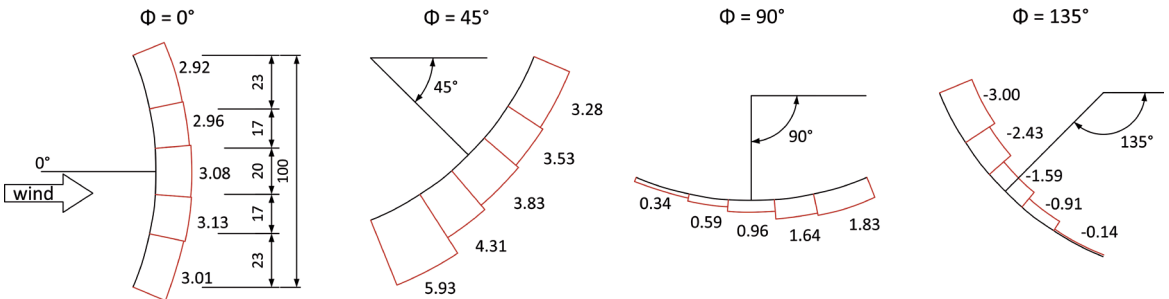


Bild 4: Verteilung der Formbeiwerte aus der Druckdifferenz auf der Parabolrinne für vier Auslenkungen [6]

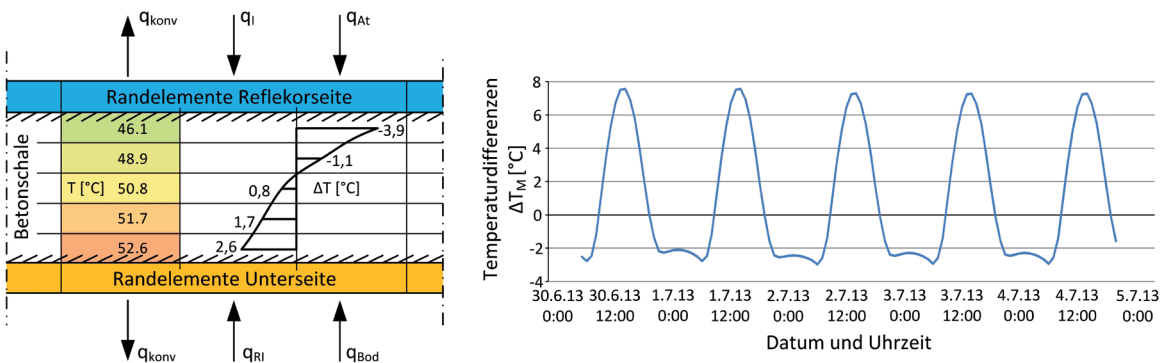


Bild 5: Numerisch diskretisiertes Wärmeübertragungsproblem einer 5 cm dicken Betonschale mit zeitlichem Verlauf der Temperaturdifferenzen für ein Grenzfallszenario.

3.2 Instationäre Temperaturfelder

Instationäre Temperaturverteilungen im Kollektor werden bestimmt durch die Umgebungslufttemperatur, direkte und indirekte Globalstrahlung der Sonne bzw. aus dem Wärmeaustausch mit benachbarten Bauteilen. Durch die Umgebungstemperatur, die Konvektion und die indirekte Strahlung, z. B. des Bodens, entstehen verformungserzeugende Temperaturänderungen in Abhängigkeit der Kollektorauslenkung, aus denen sich resultierende, ideelle Lufttemperaturen ableiten lassen, die am Bauteilrand wirken. Im Rahmen einer Abschlussarbeit [9] wurde das instationäre Wärmeübertragungsproblem aus Wärmeleitung, kurzweiliger Sonneneinstrahlung und langweiliger Einstrahlung aus der Umgebung aus der FOURIERSchen Differentialgleichung der Wärmeleitung entwickelt, numerisch diskretisiert und via expliziter Zeitintegration in der Umgebung einer Tabellenkalkulation umgesetzt. Dieser Ansatz von Zwangsbeanspruchungen aus Temperatur wurde mithilfe von Vergleichsmessungen an einer Hohlkastenbrücke verifiziert und auf einwandige Parabolrinnenschalen mit konstanter Dicke übertragen (Bild 5). Dabei sind q Wärmestromdichten. Die Ober- und Unterseite werden beeinflusst durch Konvektion (q_{konv}), die Unterseite vor allem durch Wechselwirkung mit dem Boden (q_{Bod}) und mit der reflektierten Sonnenstrahlung (q_{RI}). Für die Oberseite sind außerdem noch die Wärmestromdichten q_{At} der Atmosphäre und ein durch die Verspiegelung stark abgeminderter Anteil von q_i infolge direkter Sonnenstrahlung zu berücksichtigen. Aufgrund der festgestellten geringen Sensitivität ließ sich darauf aufbauend ein vereinfachter Berechnungsansatz mit Temperaturschwankungen bzw. Temperaturdifferenzen über die Schalendicke implementieren, welche in Anlehnung an gängige Ansätze [10] jeweils einer Wichtung unterliegen.

3.3 Zeitabhängige Kriech- und Schwindprozesse

Zeitabhängige Verformungen aus Schwindprozessen wurden vereinfacht wie eine konstante Temperaturänderung modelliert und wirken sich als Stauchung der Parabelform aus. Infolge einer Wärmebehandlung des Betonelements im jungen Alter bleiben Schwindverformungen gering [11] und haben kaum negativen Einfluss auf die Konzentration der einfallenden Sonnenstrahlen.

Aufgrund der Sonnennachführung stellen sich im Tagesverlauf unterschiedliche Spannungsverteilungen aus Eigengewicht (Dauerlast) ein. Zur Abschätzung der Kriechverformung wurde ein Ansatz hergeleitet, der die mittlere elastische Dehnung über einen Tagesverlauf beschreibt, indem eine lineare Viskoelastizitätstheorie unterstellt und durch eine „impulsartige“ Zerlegung des zeitlichen Spannungsverlaufs die Kriechdeh-

nung für einen unterstellten Tagesgang zeitlich gemittelt wird. Unter der Voraussetzung einer kontinuierlichen Sonnennachführung kann somit ein effektiver Kriechverhältniswert β_{cr} bestimmt und als Wichtungsfaktor der zugehörigen elastischen Dehnungen aus Dauerlast einer Grenzfallauslenkung angesetzt werden [6]. Durch intelligente Steuerung des Kollektors – z. B. nachts nach unten gerichtet – können Kriechverformungen theoretisch vollständig ausgeschaltet werden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass Schwind- und Kriechverformungen für die gewünschte Solarstrahlenkonzentration von untergeordneter Bedeutung sind.

3.4 Stochastischer Ansatz von Vorverformungen

Initiale Vorverformungen spiegeln herstellungsbedingte Schalungsungenauigkeiten wider, wodurch es zu einer Verzerrung der zu verspiegelnden Oberfläche kommt. Diese Abweichungen zur idealen Parabelform sind als Fluktuation eines homogenen, isotropen Zufallsfeldes abgebildet (vgl. [12]). Die Fluktuation beruht auf einer normalverteilten Zufallsgröße, welche mithilfe einer Autokovarianzfunktion über diskrete Punkte der ungestörten Parabel korreliert. Im ersten Ansatz sind die Verformungen mit Abweichungen von $\pm 0,5$ mm an Toleranzanforderungen von Tübbinginnendurchmessern mit einer Ringgröße $\leq 8,0$ m – was eine gute Approximation für ein Parabolsegment der Größenordnung des EuroTroughs darstellt – angepasst worden [13].

4 Genauigkeitsanalyse

Parabolrinnenkollektoren sollen das einfallende solare Abbild der Sonne auf linienförmige Absorberrohre im Fokuspunkt bündeln. Daher ist eine möglichst ideal parabolische Form der Schale erforderlich. Um die Verformungen des Schalentragswerks zu bewerten, ist ein integrales Genauigkeitskriterium der Kollektoroberfläche anhand des Winkelfehlers θ hergeleitet worden, welches die Wichtung der Abweichung der reflektierten Strahlungen zum idealen Fokuspunkt erlaubt [6]. Die Beschränkung auf eine primäre Abhängigkeit vom Winkelfehler – im Vergleich zu einer direkten Strahlverfolgung, vgl. [14] – ist dabei hinreichend genau, da der Einfluss einer verkrümmten Parabolform den maßgeblichen Anteil zur Strahlenablenkung im Gegensatz zu kontinuierlichen Verschiebungen hervorruft. Die Formabweichungen aus Initialverformungen bzw. bedingt durch Einwirkungen werden ausgehend von den numerischen Knotenverformungen durch kubische Splines approximiert und auf die Winkelfehler θ (vgl. Bild 1) der Kollektoroberfläche zurückgeführt, welche den Abstand der reflektierten, solaren Strahlen zum idealen Fokus beschreiben. Über eine Akzeptanzfunktion $f_{PT}(\theta)$ [15],

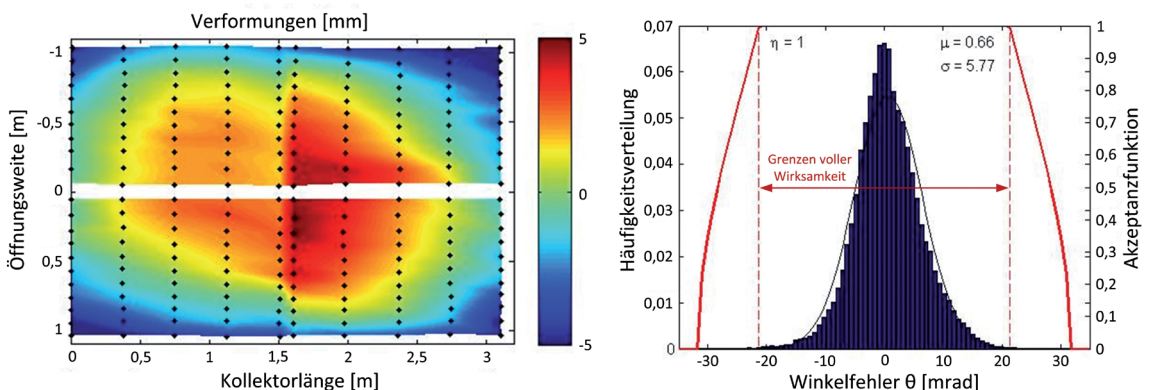


Bild 6: Gemessene Verformungen der Reflektoroberfläche und zugehörige Genauigkeitsanalyse des Großdemonstrators

welche die lokale Effizienz der Solarstrahlenkonzentration anhand des Winkelfehlers θ in Abhängigkeit der Kollektorgeometrie und des Absorberrohrdurchmessers wichtet, ergeben sich Wirksamkeitsverteilungen der lokalen Abweichungen, die zur gesamten Effektivität η der Schaleninnenfläche über die projizierte Kollektorfläche aufintegriert werden. Für Vergleichswerte ist die Häufigkeitsverteilung des Winkelfehlers mit einer Normalverteilung approximiert worden, sodass Mittelwert μ und Standardabweichung σ die Streuung der Solarstrahlen beschreiben.

Dieses Verfahren lässt sich auch auf die Auswertung von real gemessenen Formabweichungen von Parabolrinnenmodulen übertragen, wie es auch bei der Bewertung der Maßhaltigkeit des an der TU Kaiserslautern erstellten Großdemonstrators erfolgt ist. Mittels digitaler Nahbereichsphotogrammetrie [16] wurden anhand von 200 expliziten Messpunkten die Reflektoroberflächenverformungen durch das DLR, welches Partner im Projekt ist, ermittelt und der Soll-Geometrie gegenübergestellt. Diese variieren hauptsächlich zwischen +/-5 mm. Mithilfe des Genauigkeitskriteriums konnte eine volle optische Wirksamkeit nachgewiesen werden (Bild 6). Die verhältnismäßig hohe Streuung des Winkelfehlers mit einer Standardabweichung von 5,77 mrad ist auf die Welligkeit des Reflektormaterials zurückzuführen. Es lässt sich feststellen, dass sich Mikroverformungen, wie die festgestellte Welligkeit, im Gegensatz zu Makroverformungen, also kontinuierliche Verformungen, maßgeblich auf die Wirksamkeit auswirken.

5 Optimierungstrategien

5.1 Multilevel-Optimierung

Die ganzheitliche Optimierungsstrategie ist auf mehreren Ebenen (multilevel) angeordnet, sodass sie sukzessive zu einer optimalen Struktur auf Konzept-, Tragwerks- (Schale) und Detailebene führt (Bild 7). Wesentliche Entwicklungen sind dominiert durch Arbeiten auf Konzept- und Schalenebene. Auf konzeptioneller Ebene werden zunächst ingenieurmäßig sinnvolle Optimierungsmaßnahmen gewählt, wie die Zusammenführung von Reflektorfläche und Tragstruktur, die Lagerung im Schalenschwerpunkt, zusätzliche Durchspannungen (Modell EuroTrough) oder die Anordnung von neuartigen Rolllagern (Großdemonstrator).

5.2 Strukturoptimierung der Schale

Im entwickelten Verfahren zur Strukturoptimierung (Bild 8) mit anfänglich gradientenbasierten Methoden ist die multikriterielle Problemstellung – ein sowohl leichtgewichtiges als auch verformungsarmes Tragwerk – aufgelöst worden, indem eine

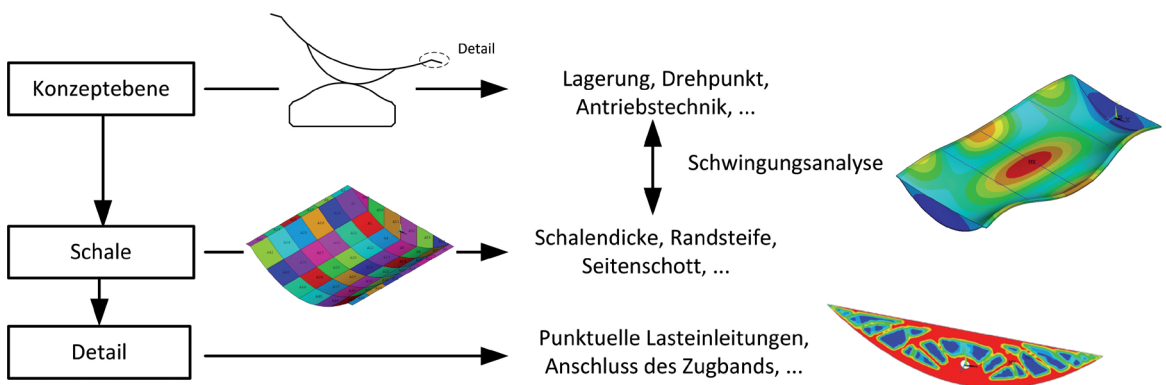


Bild 7: Multilevel-Optimierungsstrategie

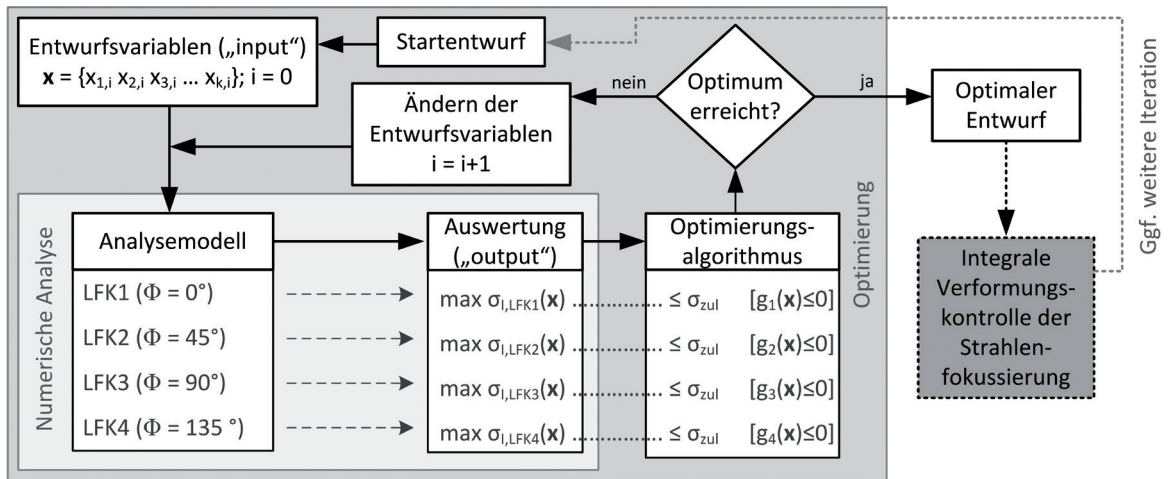


Bild 8: Ablaufdiagramm des Optimierungsprozesses zur Strukturoptimierung, nach [17]

Minimierung des Volumens die alleinige Zielfunktion beschreibt und die Steifigkeit in einer nachgeschalteten Genauigkeitsüberprüfung der Schaleninnenfläche evaluiert wird. Verschiedene, nacheinander durchlaufende Beanspruchungsszenarien in Abhängigkeit der Kollektorauslenkung beschränken den Optimierungsprozess. Restriktionen werden aufgrund der sehr steifen Betonstruktur im Wesentlichen durch einen Anteil der Zugfestigkeit des Betons beschrieben. Es konnte festgestellt werden, dass hierbei eine Kollektorauslenkung von 45°, wie es die Formbeiwerte der Windlasten vermuten lassen (vgl. Bild 4), die Übrigen dominiert. Daher sind weitere Optimierungsschritte auf diesen Restriktionsfall beschränkt: Eine nachträgliche Überprüfung erfolgte separat für einen generierten optimalen Entwurf.

Die initialen Optimierungsschritte am Modell EuroTrough beschränkten sich zunächst auf die Variation der Querschnittsebene [17], so dass anschließend in Form eines interaktiven Prozesses die Optimierungsvariablen auf Längs- und Quersystem erweitert werden konnten. Der resultierende, optimierte Kraftfluss erfordert aufgrund von Zwangsbeanspruchungen an den seitlichen Eckbereichen eine erhöhte Schalendicke. Aufgrund der über die Strukturlänge bis zur Feldmitte zunehmend dominierenden Biegespannungen verlagert sich dieser Bereich größerer erforderlicher struktureller Steifigkeit hin zum Scheitelpunkt der Parabel. Darauf basierend ist ein Modell mit diagonalem Aussteifungskonzept entwickelt worden. Weitere Konzepte mit rautenförmigen Aussteifungskonzepten und nach Vorbild von Sickenversteifungen bei Dünoblechen [18] befinden sich derzeit in Erprobung.

Aufgrund der dadurch miteinhergehenden Erhöhung der Freiwerte ist der Optimierungsprozess weiterentwickelt worden (Bild 9), indem im festgelegten Entwurfsraum mittels Latin Hypercube Sampling [19] ein sogenanntes Metamodel of Optimal Prognosis [20] erstellt wird. Dieses besitzt den Vorteil, dass mittels Antwortflächen ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Entwurfsvariablen und den Systemantworten, wie Spannungen, Verformungen und Volumen, hergestellt werden kann sowie eine Beurteilung der Korrelation zwischen diesen. Dadurch kann der Entwurfsraum auf die wesentlichen Eingangsparameter beschränkt werden und eine erste Voroptimierung auf Ebene der funktionalen Antwortflächen erfolgen. Diese dient anschließend als Basis der finalen Optimierung auf Ebene des numerischen Modells.

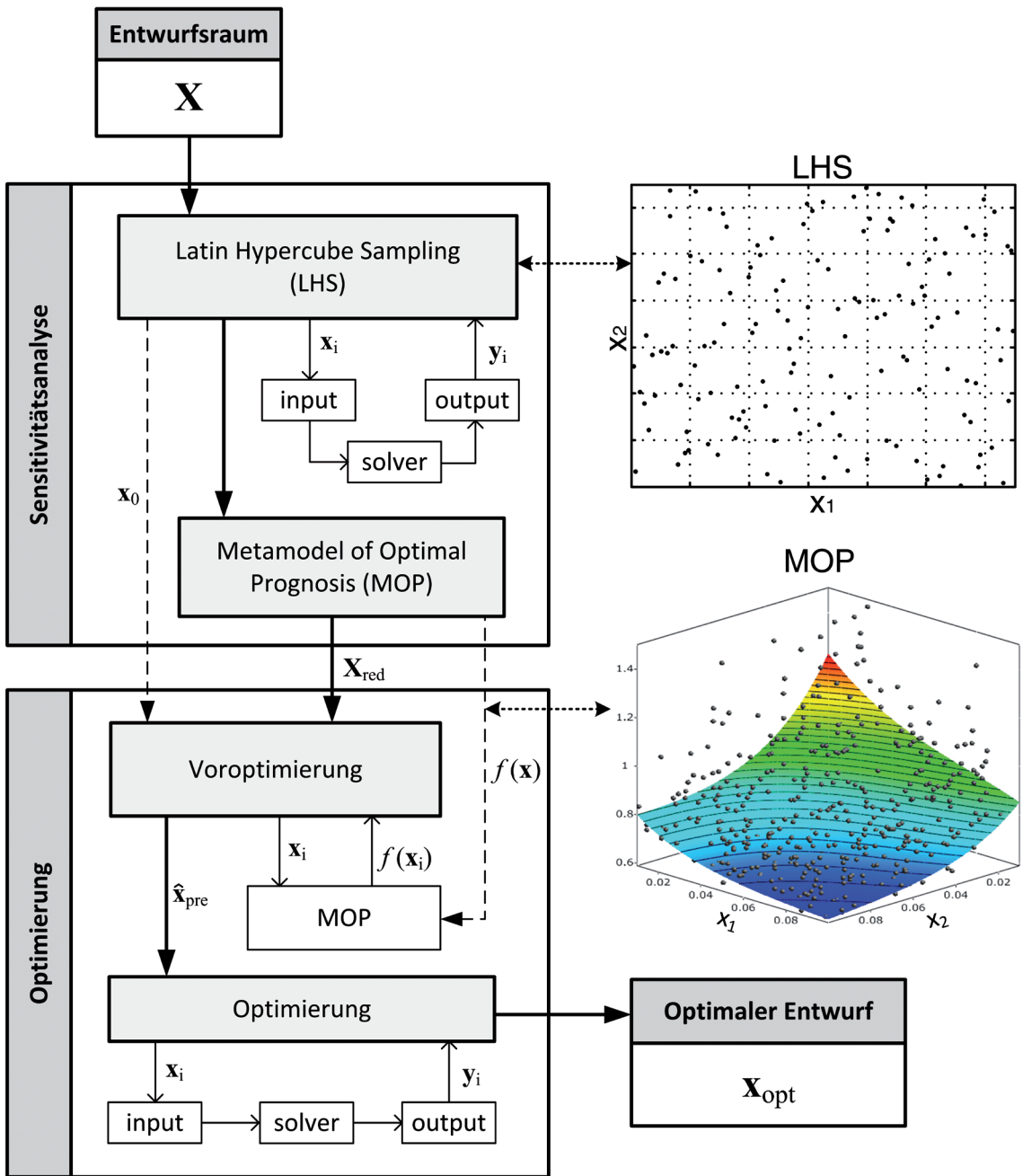


Bild 9: Ablaufdiagramm des erweiterten Optimierungsprozesses auf Strukturebene

6 Zusammenfassung und Ausblick

Parabollinnenmodule aus Beton können bereits mit wenigen Zentimetern Dicke hergestellt werden, wie es der Großdemonstrator beweist (Bild 10). Dabei konnte mithilfe eines entwickelten Genauigkeitskriteriums eine rechnerisch volle Wirksamkeit nachgewiesen werden. Ein Optimierungsprozess, der insbesondere durch eine Spannungsgeschichte infolge der Kollektorauslenkung beschränkt ist, soll sukzessiv zu einem ganzheitlich optimierten Tragwerk auf Konzept-, Schalen- und Detailebene führen. Numerische Untersuchungen verschiedener Aussteifungskonzepte müssen hierbei weiter angepasst und auch mit dem Fertigungsprozess abgestimmt werden, um zu wirtschaftlich attraktiven Betonstrukturen zu führen.

Dank

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, durch deren finanzielle Unterstützung das Projekt *Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke* im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 *Leicht Bauen mit Beton* erst ermöglicht wurde. Das gemeinschaftlich durchgeführte Teilprojekt ist durch exzellente und freundschaftliche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern an der Technischen Universität Kaiserslautern, Prof. Dr.-Ing. JÜRGEN SCHNELL und Dipl.-Ing. (FH) SÖREN MÜLLER, geprägt. Dafür sei herzlich gedankt. Dem Lehrstuhl für Windingenieurwesen und 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 und photogrammetrische Vermessung.



Bild 10: Der im SPP 1542 entstandene Großdemonstrator der TU Kaiserslautern
[Foto: Thomas Brenner]

Literatur

- [1] GEYER, M.; LÜPFERT, E.; OSUNA, R.; ESTEBAN, A.; SCHIEL, W.; SCHWEITZER, A.; ZARZA, E.; NAVA, P.; LANGENKAMP, J.; MANDELBERG, E.: EuroTrough – Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. In: STEINFELD, A. (Hrsg.): Proceedings of the 11th SolarPACES Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, 04.–06.09.2002 in Zürich (Schweiz), 7 S.
- [2] Solar Millennium: Die Parabolrinnen-Kraftwerke Andasol 1 bis 3, Eigenverlag Solar Millennium, 2008.
- [3] RIFFELMANN, K.-J.; RICHERT, T.; NAVA, P.; SCHWEITZER, A.: Ultimate Trough® – A significant step towards cost competitive CSP. Energy Procedia 49 (2014) – Proceedings of the 19th SolarPACES Conference, 17.–20.09.2013 in Las Vegas (Nevada, USA), S. 1831–1839.
- [4] 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. (Hrsg.): Proceedings of the World Renewable Energy Congress VI, 01.–07.07.2000 in Brighton (UK), S. 994–997.
- [5] 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.
- [6] MÜLLER, S.; FORMAN, P.; SCHNELL, J.; MARK, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11, S. 752–762.
- [7] OYA, J.; KALENER-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: Proceedings of the European-African Conference on Wind Engineering EACWE 2013, 07.–11.07.2013 in Cambridge (UK), 4 S.
- [8] COOK, N. J.: The designer's guide to wind loading of building structures – part 2: Static Structures. Butterworth-Heinemann Ltd, 1990.
- [9] HOLZMANN, K.: Untersuchungen instationärer Temperaturfelder an einer Spannbetonbrücke. Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Massivbau, 2013.
- [10] DIN EN 1991-1-5:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen. Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC:2009, Februar 2011.
- [11] DEUSE, T.; PARKER, F.: Längenänderung von Prismen und Schwindrinnenversuch mit der Nanodur-Standardrezeptur Maschinenbau. Interner Prüfbericht des Wilhelm-Dyckerhoff-Instituts, Wiesbaden, Januar 2010.
- [12] AHRENS, M. A.: Ein stochastisches Simulationskonzept zur Lebensdauerermittlung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken und seine Umsetzung an einer Referenzbrücke. Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum, Dezember 2010.
- [13] GRÜBL, F.; BILLIG, B.; BÖHME, T.; KIRSCHKE, D.; MARK, P.; MAYER, P.-M.; NEUENSCHWANDER, M.; SCHUCK, W.; TIRPITZ, E.-R.; WINSELMANN, D. (Arbeitskreis Tübingdesign des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen, DAUB): Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2014, Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 17–121.
- [14] 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.): Proceedings of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 297–302.

- [15] 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.
- [16] SHORTIS, M. R.; JOHNSTON, G. H. G.: Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part I: Measurements of Surfaces. Journal of Solar Engineering 118 (1996), Aug., S. 146–150.
- [17] FORMAN, P.; MÜLLER, S.: Verformungsoptimierte Parabolrinnenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 15–22.
- [18] SCHWARZ, D.: Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas). FAT Schriftenreihe Nr. 168, Frankfurt am Main, 2002.
- [19] STEIN, M.: Large sample properties of simulations using Latin Hypercube Sampling. Technometrics 29 (1987), Heft 2, S. 143–151.
- [20] MOST, T.; WILL, J.: Meta-model of Optimal Prognosis – An automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection. In: Proceeding of the Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0, 20.–21.11.2008, 21 S.

Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Patrick Forman

Projektlaufzeit

06/2011 – 05/2014

Projektpartner

TU Kaiserslautern:
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell, Dipl.-Ing. (FH) Sören Müller
| Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion

Ruhr-Universität Bochum:
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer | Lehrstuhl für Windenergie-
wesen und Strömungsmechanik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR):
Dipl.-Ing. Klaus Hennecke | Institut für Solarforschung,
Linienfokussierende Systeme

Web

www.massivbau.rub.de