

Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Sören Müller

aus Karlsruhe

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Robert Jüpner
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Tag der mündlichen Prüfung:	05.02.2016

Kaiserslautern 2016

(D 386)

Sören Müller

**Zur Auslegung von innovativen
Betonkollektorelementen
für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern im Wesentlichen in den Jahren 2011 bis 2014.

An erster Stelle möchte ich dem Leiter des Fachgebiets und ersten Berichtersteller Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell für die Möglichkeit der Durchführung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und die umfassende Betreuung dieser Arbeit danken.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark für die Erstellung des zweiten Berichts und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz für die Leitung der Prüfungskommission.

Die Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark und Herrn Dipl.-Ing. Patrick Forman vom Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum bei der gemeinsamen Bearbeitung des Forschungsprojekts *„Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke“* im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms *„Leicht Bauen mit Beton“ SPP 1542* war äußerst erfolgreich und angenehm.

Maßgeblich am Entstehen dieser Arbeit beteiligt waren die für die Koordination dieses Schwerpunktprogramms Verantwortlichen Herr Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach sowie die Geschäftsführerin Frau Dr.-Ing. Silke Scheerer vom Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden. In diesem Zusammenhang seien auch alle Mitdoktorandinnen und Mitdoktoranden erwähnt, die die zahlreichen gemeinsamen Arbeitstreffen, Workshops und Konferenzen und die dabei geführten Diskussionen ermöglichten.

Ich danke dem Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) der Hochschule Mainz, insbesondere meinem Vater Prof. Dr.-Ing. Hartmut Müller, für die umfassende Unterstützung bei der Durchführung sowie der anschließenden Dokumentation der Versuchsreihe zur Formstabilität des verwendeten Betons.

Herr Dipl.-Ing. Hannes Weicken vom Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover lieferte wertvolle Unterstützung bei den Untersuchungen des Schwindverhaltens.

Die gute Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, insbesondere mit Herrn Dipl.-Ing. Klaus Hennecke und Herrn Dipl.-Phys. Christoph Prahel bei der Vermessung des Großdemonstrators und bei der anschließenden Interpretation und Dokumentation der Messergebnisse trug ebenfalls zur erfolgreichen Bearbeitung des vorliegenden Forschungsprojekts bei.

Wertvolle Hilfe in Form von fachlichem Rat und vielen Diskussionen bei betontechnologischen Belangen leisteten Herr Dipl.-Ing. Thomas Deuse von der Dyckerhoff AG und Herr Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister von der durcrete GmbH.

Einen entscheidenden Beitrag lieferten auch meine Kolleginnen und Kollegen innerhalb des Fachgebiets und des Fachbereichs Bauingenieurwesen durch konstruktive Gespräche und ihre sonstige Unterstützung.

Allen Mitarbeitern des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau und des Materialprüf-
amts der Technischen Universität Kaiserslautern sowie meinen studentischen Hilfs-
kräften danke ich für die Herstellung der Versuchskörper sowie für die Unterstützung
bei den Versuchsdurchführungen und beim Bau des Großdemonstrators.

Herr Raffael Weißbach trug durch seine Mitarbeit zur Realisierung des Großde-
monstrators bei.

Für sein akribisches Korrekturlesen dieser Arbeit sowie für zahlreiche Diskussionen
über mathematische Fragestellungen danke ich meinem guten Freund
Herrn Dr. rer. nat. Michael Busch.

Karlsruhe, 2016

Sören Müller

Kurzfassung

Parabolrinnen stellen die wirtschaftlichste Form der solarthermischen Kraftwerke mit Solarstrahlenkonzentration dar. Die Kollektorelemente sind der entscheidende Faktor für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Parabolrinnenkraftwerks. Stand der Technik ist es, die Kollektoren als räumliche Stahlfachwerke mit punktförmig gestützten Spiegeln auszuführen. Zu diesem Konstruktionsprinzip sind Alternativen möglich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Machbarkeit einer wirtschaftlichen Konstruktionsvariante für die Ausführung der Parabolrinnen unter Verwendung des Werkstoffs Beton untersucht.

Die dabei erörterten Fragestellungen umfassen ein breites Spektrum. Ein Schwerpunkt liegt auf der Konzeptionierung einer geeigneten Betonrezeptur und den damit verbundenen betontechnologischen Herausforderungen. Diese waren stets unter dem Gesichtspunkt einer schnellen Festigkeitsentwicklung zu betrachten. Des Weiteren konnte ein Großdemonstrator konzeptionell und baulich realisiert werden, durch welchen die Bauweise eines Parabolrinnenkollektorelements aus hochfestem Beton vor Augen geführt wird. Diesem sind zwei Innovationen immanent: Zum einen die Verwendung des Werkstoffs Beton, zum anderen sein neuartiges Auflagerungskonzept. Der fertiggestellte Großdemonstrator wurde in einer Genauigkeitsanalyse mittels optischer Messverfahren hinsichtlich seines Interceptfaktors, eine Kenngröße, von welcher der Systemwirkungsgrad abhängt, beurteilt. Ein weiterer betrachteter Aspekt ist die Maßhaltigkeit und Formstabilität von Beton, da durch Abweichungen von ihrer Sollgeometrie der Interceptfaktor einer Parabolrinne reduziert wird. Anhand von numerischen Untersuchungen wurden die unter realitätsnahen Bedingungen an einem geeigneten Standort auftretenden Verformungen für den Großdemonstrator analysiert und in Form einer rechnerischen Wirksamkeitsbeurteilung interpretiert.

Abstract

Parabolic troughs are the most economic type of solarthermal power plants working by concentrating solar power. The collector elements are the most influencing factor concerning the cost effectiveness of the whole power plant. State of the art is to construct the collectors as spatial steel truss systems with point-wise supported mirrors. Alternatives to this construction principle exist.

In the thesis at hand the feasibility of an economic way of constructing of an economic execution of the parabolic troughs while using concrete as construction material was analyzed.

The spectrum of the discussed questions is large. One focus was put on the conception of a suitable concrete and the connected challenges concerning the concrete technology. These were always to be considered under the aspect of a fast development of the strength. Furthermore, a full-size demonstrator was planned and built, which shows the construction method of a parabolic trough collector element using high-strength concrete. Two innovations are immanent: On the one hand, the use of the construction material concrete, on the other hand its novel supporting concept. The completed full-size demonstrator was evaluated regarding its intercept factor (a parameter by which the efficiency factor of the system is influenced) by using a precision analysis using optical measurement methods. Another examined aspect is the dimensional accuracy and stability of concrete because by deviations from the target geometry the intercept factor of a parabolic trough is reduced. By means of numerical methods the deflections, which result under realistic conditions at a suitable location, were analyzed and in due form of a mathematical effectiveness assessment interpreted.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Zugrunde liegendes Forschungsvorhaben	2
1.4 Gliederung dieser Arbeit	2
2 Stand der Technik bestehender solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke	4
2.1 Übersicht Concentrated Solar Power-Systems	4
2.2 Parabolrinnenkraftwerke	6
2.2.1 Historische Entwicklung	6
2.2.2 Funktionsprinzip	9
2.2.3 Kosten	11
2.2.4 Bau von Parabolrinnenfeldern solarthermischer Kraftwerke	11
2.2.5 Standorte	14
2.2.6 Lebensdauer	16
2.2.7 Wirkungsgrad	16
3 Neues Konzept von Parabolrinnen aus hochfestem Beton – Entwicklung eines Großdemonstrators	17
3.1 Verbesserungspotential bestehender Kollektorelemente	17
3.2 Konzept innovativer Kollektorelemente aus Beton	17
3.2.1 Verwendung des Werkstoffs Beton	18
3.2.2 Neuartiges Auflagerungskonzept und Antrieb	18
3.2.3 Geometrie des Großdemonstrators	19
3.3 Abgrenzung zu bestehenden Systemen	20
3.4 Erzeugung der Geometrie des Großdemonstrators	21

3.5	Erzeugung des CAD-Modells des Großdemonstrators	24
4	Betonwahl und durchgeführtes Untersuchungsprogramm - Nanodur[®]- Beton	25
4.1	Anforderungen an einen Beton für Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke	25
4.2	Beispiele aus der Praxis für die Anwendung von Nanodur [®] -Beton	26
4.3	Besonderheiten von Nanodur [®] -Beton	28
4.4	Betonausgangsstoffe, -rezepturen, -herstellung, Wärmebehandlung	29
4.4.1	Ausgangsstoffe	29
4.4.1.1	Bindemittel	29
4.4.1.2	Gesteinskörnung	30
4.4.1.3	Zusatzmittel	30
4.4.2	Mischungsberechnungen	31
4.4.3	Betonherstellung	33
4.5	Durchgeführte Frischbeton- und Festbetonuntersuchungen	33
4.5.1	Frischbetoneigenschaften	34
4.5.1.1	Frischbetontemperatur	34
4.5.1.2	Setzfließmaß und t_{500} -Zeit	35
4.5.1.3	Blockierring-Versuch und t_{500J} -Zeit	36
4.5.1.4	Frischbetonrohddichte	38
4.5.1.5	Luftgehalt	38
4.5.1.6	Auslauftrichter-Versuch	38
4.5.1.7	Zusammenfassung	39
4.5.2	Festbetonrohddichte	40
4.5.3	Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme	40
4.5.4	Frühe Entwicklung der Betonfestigkeiten in Abhängigkeit des Erhärtungsbeschleunigergehalts	43
4.5.4.1	Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeit	43
4.5.4.2	Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit	44
4.5.4.3	Entwicklung der Betondruckfestigkeit	45
4.5.5	Untersuchungen einer Wärmebehandlung	47

4.5.5.1	Einfluss der Probekörperlagerung und einer Wärmebehandlung auf die 28 Tage – Betonfestigkeiten _____	47
4.5.5.2	Einfluss eines Austrocknungsschutzes während der Wärmebehandlung auf die Betonfestigkeiten _____	54
4.5.6	Elastizitätsmodul unter Druckbelastung (Sekantenmodul) _____	55
4.5.7	Karbonatisierung _____	55
4.5.7.1	Allgemeines zur Karbonatisierung von Beton _____	56
4.5.7.2	Versuchsprogramm _____	57
4.5.7.3	Herstellen der Versuchskörper, Versuchsaufbau und -durchführung	58
4.5.7.4	Versuchsergebnisse und -auswertung _____	61
4.5.8	Chlorideindringwiderstand _____	62
4.5.8.1	Allgemeines zur chloridinduzierten Korrosion von hochfestem Beton	62
4.5.8.2	Versuchsprogramm _____	62
4.5.8.3	Herstellen der Versuchskörper, Versuchsaufbau und -durchführung	63
4.5.8.4	Versuchsergebnisse und -bewertung _____	64
4.6	Weitere Materialkennwerte von Nanodur [®] -Beton _____	66
4.7	Fazit _____	67
5	Schwinden und Maßhaltigkeit bei der Herstellung _____	68
5.1	Schwindverhalten des verwendeten Nanodur [®] -Betons _____	68
5.1.1	Allgemeines zum Schwinden von hochfestem Beton _____	68
5.1.2	Überprüfung der Formstabilität unter Schwindeinfluss an kreissegmentförmigen Probekörpern _____	69
5.1.3	Schwindkegelverfahren _____	76
5.2	Vermessungen und Genauigkeitsanalyse des Großdemonstrators _____	83
5.2.1	TARMES _____	84
5.2.2	Digitale dreidimensionale Nahbereichsphotogrammetrie _____	88
5.2.3	Fazit der beiden Vermessungen _____	90
6	Methodik zur Ermittlung des Interceptfaktors _____	93
6.1	Hintergrund _____	93
6.2	Methodik zur Berechnung des Interceptfaktors einer Parabolrinne _____	93
6.3	Berechnung des Interceptfaktors eines Parabolrinnenschnitts _____	94

6.3.1	Variante 1	95
6.3.1.1	Entwicklung von Variante 1	95
6.3.1.2	Verifikation von Variante 1 – Ermittlung des Interceptfaktors des unverformten Parabolrinnenschnitts	104
6.3.2	Variante 2	104
6.3.2.1	Entwicklung von Variante 2	104
6.3.2.2	Verifikation von Variante 2 – Ermittlung des Interceptfaktors der unverformten Parabolrinne	106
6.3.3	Vergleich und Bewertung der beiden Varianten	106
6.4	Berechnung des Interceptfaktors einer Parabolrinne	107
7	Modellierung des Großdemonstrators zur Herstellungsoptimierung und zur Ermittlung von standortabhängigen Interceptfaktoren	109
7.1	Finite-Elemente-Analysen und Generierung des Modells	109
7.2	Finite-Elemente-Berechnung	111
7.2.1	Generierung des Finite-Elemente-Modells	111
7.2.2	Materialparameter und Randbedingungen	111
7.2.3	Erstellung des Finite-Elemente-Netzes	112
7.2.3.1	Netz „Thermisch-transiente Analyse“	113
7.2.3.2	Netz „Statisch-mechanische Analyse“	113
7.3	Ermittlung der optimalen Herstellgeometrie bezüglich Schwindens	113
7.3.1	Statisch-mechanische Analyse	114
7.3.2	Berechnungsergebnis	115
7.4	Quantifizierung einer eventuellen Interceptfaktorverringerung infolge des Lastfalls Temperatur	117
7.4.1	Simulierter Standort des Großdemonstrators	118
7.4.2	Meteorologische Daten	118
7.4.3	Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur Erzeugung der verformten Geometrie	119
7.4.3.1	Thermisch-transiente Analyse	120
7.4.3.2	Statisch-mechanische Analyse	120
7.4.4	Ermittlung des Interceptfaktors	123
7.5	Mögliches Fertigungsprinzip	126

8	Entwurf und bauliche Realisierung eines Großdemonstrators	128
8.1	Planung	128
8.2	Bauliche Umsetzung	130
8.2.1	Auflager und Rippen	130
8.2.1.1	Bewehrung	130
8.2.1.2	Schalung und Betonage	130
8.2.2	Parabolrinne	131
8.2.2.1	Bewehrung	131
8.2.2.2	Einfluss der Schalung auf die Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme	133
8.2.2.3	Schalung und Betonage	136
8.2.2.4	Aufkleben der Auflagerrippen	139
8.2.3	Verspiegelung	139
8.2.4	Receiver	145
8.2.5	Fertigstellung des Großdemonstrators	146
9	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Regelwerke und Normen	153
	Literaturverzeichnis	156
	Lebenslauf	169

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Einteilung der solarthermischen Kraftwerke nach <i>Schiel 2004</i>	4
Abb. 2.2: Unterschiedliche Prinzipien der Solarkonzentration: Parabolrinnen-, Solarturm-, Linear Fresnel- und Paraboloidkraftwerk (Quelle: <i>Breuer 2014</i>).....	5
Abb. 2.3: Gegenüberstellung der drei derzeitigen Parabolrinnengenerationen (Quelle: <i>Schiel 2011</i> , mit eigenen Ergänzungen)	7
Abb. 2.4: Beispiele verschiedener Kollektorkonzepte Oben: LS3-Kollektor mit Raumfachwerk, unten links: Eurotrough mit Torsionskasten, unten rechts: SL4600 mit Torsionsrohr (Quelle: http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/solare-waerme/publikation/solarthermische-kraftwerke-2/parabolrinnen-kollektortechnik/ , zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)	9
Abb. 2.5: Funktionsprinzip der Strahlungssammlung bei einer Parabolrinne (Quelle: <i>Solar Millenium 2011</i>)	10
Abb. 2.6: Funktionsschema eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks (Quelle: <i>Nava 2007 a</i>)	11
Abb. 2.7: Drei Einstellvorrichtungen zur Serienfertigung von Parabolrinnenkollektoren (Quelle: <i>Nava 2007 a</i>).....	12
Abb. 2.8: Einstellvorrichtungen (Jigs) für die Serienfertigung von Kollektorelementen (Quelle: <i>Nava 2007 a</i>).....	13
Abb. 2.9: Vermessung in der Montagelinie mittels Photogrammetrie, links: Kollektorstruktur mit Zielmarken bei der 3D-Messung, rechts: Kamera-Shuttle auf dem Schienensystem (Quellen: <i>Pottler 2007</i> und <i>Ulmer 2007</i>).....	14
Abb. 2.10: Transport eines montierten Kollektorsegments in das Solarfeld und anschließende Montage (Quellen: rechts: <i>Nava 2007 a</i> , unten: http://paul-langrock.de/docs/andasol.htm , zuletzt zugegriffen am 17.12.2014).....	14
Abb. 2.11: Geeignete Standorte für solarthermische Kraftwerke (Quelle: <i>Konz 2014</i>)	15
Abb. 3.1: Innovatives Auflagerungskonzept (Computeranimation: Firma solarsolid)	19
Abb. 3.2: PTC 1800-Kollektor auf dem DLR-Prüfstand Sopran in Köln-Porz (Quelle: <i>Janotte 2009</i>).....	20
Abb. 3.3: Prototyp eines Betonkollektors mit pneumatischen Polymerspiegeln in Biasca, Schweiz (Quelle: http://www.pre.ethz.ch/research/projects/?id=airlight , zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)	20
Abb. 3.4: links: Spiegelauflegerkonstruktion aus Betonfertigteilen, rechts: Auflagerungskonzept mittels Rollenlagern (Quelle: <i>Bader 2011</i>)	21
Abb. 3.5: Geometrischer Aufbau eines Parabolsegments (Quelle: <i>Müller 2013 b</i>)	22
Abb. 3.6: Geometrie der Schalung	23
Abb. 3.7: Mittels Microsoft Excel erzeugte Parabolrinnengeometrie	24
Abb. 4.1: Garderobenstelen im neueröffneten Bibelhaus (Quelle: <i>Opus C 2011</i>).. ..	27
Abb. 4.2: Maschinenbetten aus Hochleistungsbeton (Quelle: <i>Durcrete 2011 b</i>) 28	
Abb. 4.3: ELBA Labor-Zwangsmischer EMS 60 C	33

Abb. 4.4:	Bestimmung des Setzfließmaßes SF sowie der t_{500} -Zeit gemäß <i>DIN EN 12350-8</i>	36
Abb. 4.5:	Bestimmung des Ausbreitmaßes SF_J , der Fließzeit t_{500J} sowie der Blockierneigung PJ von M1, M2 und M3 gemäß <i>DIN EN 12350-8</i>	37
Abb. 4.6:	Bestimmung des Luftgehaltes gemäß <i>DIN EN 12350-7</i>	38
Abb. 4.7:	Auslauftrichterversuch gemäß <i>DIN EN 12350-9</i>	39
Abb. 4.8:	Versuchsaufbau Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme unter adiabatischen Bedingungen, links: Thermobehälter, rechts: Datenlogger zum Aufzeichnen der Temperaturentwicklung	41
Abb. 4.9:	Temperaturverläufe infolge Hydratationswärme von M1, M2 und M3 unter adiabatischen Bedingungen.....	42
Abb. 4.10:	Dreipunktbiegeversuch nach <i>DIN EN 12390-5</i>	43
Abb. 4.11:	Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeiten der Mischungen M1, M2 und M3	44
Abb. 4.12:	Zeitliche Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 (rechnerisch ermittelte Werte).....	45
Abb. 4.13:	Ermittlung der Betondruckfestigkeit in Anlehnung an <i>DIN EN 12390-3</i> ..	46
Abb. 4.14:	Entwicklung der Betondruckfestigkeiten der Mischungen M1, M2 und M3	46
Abb. 4.15:	Durchgeführtes Wärmebehandlungsregime mit einer Maximaltemperatur von 90 °C.....	48
Abb. 4.16:	Probekörper (nicht gegen Austrocknung geschützt) bei der Wärmebehandlung.....	49
Abb. 4.17:	Betonfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	51
Abb. 4.18:	Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	51
Abb. 4.19:	Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	52
Abb. 4.20:	Berechnete zentrische Zugfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	52
Abb. 4.21:	Stempeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	53
Abb. 4.22:	Einfluss eines Austrocknungsschutzes auf die Betonfestigkeiten.....	55
Abb. 4.23:	oben links: Prismen im Prüfschrank mit erhöhtem CO ₂ -Gehalt, unten links: Prismen unter Normklimabedingungen, rechts: Prismen unter Umgebungsbedingungen im Freien	59
Abb. 4.24:	Definitionen der Karbonatisierungstiefe d_k (Quelle: <i>RILEM 1988</i>)	59
Abb. 4.25:	Messstellen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe am gespalteten Prisma.....	60
Abb. 4.26:	Gegenüberstellung der Karbonatisierungstiefen von M1, M1_W (warmbehandelt), M2 und M3 nach 180 Tagen Lagerung unter Normklimabedingungen, Lagerung bei 2 % CO ₂ -Gehalt und Lagerung im Freien	61
Abb. 4.27:	links: Prinzipskizze des Migrationsapparates (Quelle: <i>BAW 2012</i>), rechts: Versuchsaufbau an der TU Kaiserslautern, unten: Prüfkörper einige Monate nach Versuchsende (links: Chromat, rechts: Fluor).....	64

Abb. 4.28: Vergleich der einzuhaltenden Mittelwerte und größten zulässigen Einzelwerte der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse mit den Versuchsergebnissen	66
Abb. 5.1: Geometrie der Probekörper mit verschiedenen Schalendicken und einer Schalenbreite von 80 mm (Angaben in [mm])	70
Abb. 5.2: Versuchsaufbau in einer Klimakammer der TU Kaiserslautern.....	70
Abb. 5.3: Aktive Methoden zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen (Quelle: <i>Gühling 2002</i>).....	71
Abb. 5.4: Funktionsprinzip der aktiven Triangulation mit Streifenprojektor (Quelle: <i>Wiora 2001</i>)	71
Abb. 5.5: Schematische Darstellung des GOM ATOS III Sensors (Quelle: <i>GOM 2009</i>)	72
Abb. 5.6: Links: Probekörper, rechts: mittels der Laserscanmethode erstelltes 3D-Modell	72
Abb. 5.7: Mittels der Laserscanmethode ermittelte Verformungsfigur nach 3 Tagen bezogen auf den Nullzeitpunkt, Typ 010-010.....	73
Abb. 5.8: Verformung der Betonkörper über den Messzeitraum von 28 Tagen .75	
Abb. 5.9: Wellrohrmethode (Quellen: links: <i>Jensen 1995</i> , rechts: <i>Jensen 2001</i>)	76
Abb. 5.10: Schematischer Versuchsaufbau Schwindkegelverfahren (Quelle: <i>Schleibinger 2013</i>).....	77
Abb. 5.11: Gemessene Verformungen der Mischungen M1, M2 und M3 infolge von Setzen, Entlüften und chemischem Schwinden.....	78
Abb. 5.12: links: Versuchsaufbau mit aufrecht stehendem Vicat-Ring zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns (Quelle: <i>DIN EN 196-3</i>), Mitte: Versuchsaufbau mit umgekehrtem Vicat-Ring zur Bestimmung des Erstarrungsendes (Quelle: <i>DIN EN 196-3</i>), rechts: Versuchsaufbau an der TU Kaiserslautern	80
Abb. 5.13: Gegenüberstellung der Erstarrungszeiten von M1, M2 und M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (<i>DIN EN 196-3</i>)	82
Abb. 5.14: Autogene Schwindverformungen nach jeweils ermittelter t_0 -Zeit der Mischungen M1, M2 und M3	83
Abb. 5.15: Messverfahren 1 – Deflektometrie (TARMES).....	86
Abb. 5.16: Messergebnisse der Deflektometrie, oben: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm], Mitte: Abweichung der reflektierten Strahlen von der Fokallinie in [mm], unten: Interceptfaktor in [%].....	87
Abb. 5.17: Messverfahren 2 – Vorbereiteter Großdemonstrator für die Vermessung mittels Nahbereichsphotogrammetrie (oben: Quelle <i>Forman 2015</i>).....	89
Abb. 5.18: Messergebnisse der Nahbereichsphotogrammetrie: links: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm]	89
Abb. 5.19: Verifikation der Messergebnisse, Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm], links: Deflektometrie, rechts: Nahbereichsphotogrammetrie.	90
Abb. 5.20: Auswertung der Messergebnisse der Nahbereichsphotogrammetrie, links: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in Krümmungsrichtung in [mm], rechts: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm] in Kollektorlängsrichtung (Quelle: <i>Forman 2014</i>)	91
Abb. 6.1: Unveränderlichkeit der Absorberrohrposition, links: Annahme für Simulation, rechts: System Großdemonstrator.....	94

Abb. 6.2:	Berechnungsgrundlage Variante 1	95
Abb. 6.3:	Winkel zwischen zwei Vektoren.....	97
Abb. 6.4:	oben: Anwendung von Variante 1 für die unverformte Parabolrinne, unten: Anwendung von Variante 1 für eine verformte Parabolrinne (exemplarisch, stark überhöht)	103
Abb. 6.5:	Berechnungsgrundlage Variante 2	104
Abb. 6.6:	Gewichtungssystematik bei der Berechnung des Gesamtinterceptfaktors	108
Abb. 7.1:	Ablaufschema der mittels ANSYS® durchgeführten Finite-Elemente- Analysen	110
Abb. 7.2:	12 Uhr-Stellung mit angetragener Eigenlast	110
Abb. 7.3:	Mittels ANSYS® erzeugtes Modell des Großdemonstrators mit den zehn festgelegten Schnitten	111
Abb. 7.4:	Finite-Elemente-Netz der Parabolrinne.....	113
Abb. 7.5:	Auflagerbedingungen der Parabolrinne für die Schwindberechnungen..	114
Abb. 7.6:	Herzulegende und zu erzielende, ideale Geometrie der Parabolrinne (oben 140-fach, unten 100-fach überhöhte Darstellung)	116
Abb. 7.7:	Rechnerische Längenänderung der Parabolrinne infolge thermischer Bedingung	117
Abb. 7.8:	Spannungsverteilung infolge thermischer Bedingung.....	117
Abb. 7.9:	Plataforma Solar de Almería (http://www.evwind.com/wp-content/uploads/2013/04/plataforma_solar_almeria.jpg , zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)	118
Abb. 7.10:	Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur am 22.07.2009.....	119
Abb. 7.11:	Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Innenseite der Parabolrinne auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) am 22.07.2009 um 18 Uhr, nach einem Tag, Anfangstemperatur 20°C	120
Abb. 7.12:	Auflagerbedingungen der Parabolrinne für die Temperaturberechnungen.....	121
Abb. 7.13:	Gesamtverformung der Parabolrinne auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) am 22.07.2009 um 18 Uhr, nach 1 Tag, Anfangstemperatur 20°C (140-fach überhöht dargestellt)	122
Abb. 7.14:	Rechnerische Spannungsverteilung der Parabolrinne in den Hauptachsen am 22.07.2009 um 18 Uhr auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) (410-fach überhöhte Darstellung).....	123
Abb. 7.15:	Mögliches Fertigungsverfahren zur Serienproduktion von Parabolrinnen in Betonbauweise.....	127
Abb. 8.1:	Geometrieplanung des Auflagerkonzepts des Demonstrators (Einheiten in [mm]), (Zeichnung: Firma solarsolid).....	129
Abb. 8.2:	Computeranimation des Großdemonstrators (Animation: Firma solarsolid)	129
Abb. 8.3:	Komponenten des Großdemonstrators (ohne Spiegelbleche) (Animation: Firma solarsolid).....	130
Abb. 8.4:	Bewehrung, Schalung und Betonage der Auflagerkonstruktion.....	131
Abb. 8.5:	links: Computeranimation der Auflagerkonstruktion (Animation: Firma solarsolid), rechts: fertiggestelltes Auflager, (1) Rippe, (2) Unterteil.....	131

Abb. 8.6:	Bewehrung der Parabolrinne und Abstandhalter	132
Abb. 8.7:	links: Versuchsaufbau Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme in Abhängigkeit des verwendeten Schalungsmaterials (Versuchsreihe M1, Kunststoff), rechts: Zylinderschalung aus Stahl.....	134
Abb. 8.8:	Temperaturverläufe infolge Hydratationswärme von M1, M2 und M3 bei unterschiedlichen Schalungsmaterialien	135
Abb. 8.9:	Fertig gestellte Polystyrol-GFK-Schalung und ausgeschalter Probekörper (unbeschichtet)	137
Abb. 8.10:	Schalung der Parabolrinne des Großdemonstrators.....	138
Abb. 8.11:	links: Aufrauen der Betonoberfläche, rechts: Verklebung der Auflagerrippen mit der Parabolrinne.....	139
Abb. 8.12:	Vergleich zweier Verspiegelungskonzepte, links: Aluminiumblech, rechts: selbstklebende Spiegelfolie	140
Abb. 8.13:	Abreißprüfung zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit zwischen Nanodur [®] -Beton und PVD-beschichtetem Aluminiumblech	143
Abb. 8.14:	oben links: Vorbereiteter Klebeuntergrund und doppelseitiges Haftklebeband, oben rechts: Aufspachteln des Reaktivklebstoffs, unten: Applikation eines Spiegelblechs	145
Abb. 8.15:	Verwendetes Receiverrohr der Schott AG mit technischen Angaben (Quelle: <i>Benz 2007</i>)	146
Abb. 8.16:	Fertig gestellter Großdemonstrator an der TU Kaiserslautern (Fotos: Thomas Brenner)	148
Abb. 9.1:	Machbarkeitsstudie neue Parabolrinnengeneration aus hochfestem Beton (Animation: Firma solarsolid)	152

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Vergleich unterschiedlicher Kraftwerkstypen zur solarthermischen Elektrizitätserzeugung nach <i>Watter 2009</i> und <i>BINE 2008</i>	5
Tab. 2.2:	Übersicht der drei Parabolrinnengenerationen nach <i>Schiel 2011</i> und <i>Schiel 2012</i>	8
Tab. 4.1:	Bindemitteldaten mit Normsand bei w/z-Wert 0,5 nach <i>DIN EN 196-1</i> (nach <i>Dyckerhoff 2013</i>)	29
Tab. 4.2:	Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen.....	30
Tab. 4.3:	Technische Daten des verwendeten Fließmittels (nach <i>BASF 2013 c</i>) ..	30
Tab. 4.4:	Technische Daten des verwendeten Schwindreduzierers (nach <i>Grace 2012</i>)	30
Tab. 4.5:	Technische Daten des verwendeten Erhärtungsbeschleunigers (nach <i>BASF 2013 a</i> und <i>BASF 2013 b</i>).....	31
Tab. 4.6:	Betonrezepturen Nanodur [®] -Beton M1, M2 und M3	32
Tab. 4.7:	Mischregime	33
Tab. 4.8:	Frischbetontemperatur von M1, M2 und M3	35
Tab. 4.9:	Setzfließmaß SF von M1, M2 und M3.....	36
Tab. 4.10:	t ₅₀₀ -Zeit von M1, M2 und M3.....	36
Tab. 4.11:	Ausbreitmaß SF _J von M1, M2 und M3	37
Tab. 4.12:	Fließzeit t _{500J} von M1, M2 und M3	37
Tab. 4.13:	Blockierneigung PJ von M1, M2 und M3.....	37
Tab. 4.14:	Frischbetonrohddichte von M1, M2 und M3.....	38
Tab. 4.15:	Luftgehalt von M1, M2 und M3	38
Tab. 4.16:	Auslauftrichter-Fließdauer t _V von M1, M2 und M3	39
Tab. 4.17:	Festbetonrohddichte von M1 gemäß <i>DIN 1048-5</i>	40
Tab. 4.18:	Versuchsmatrix Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeiten über die Zeit von M1, M2 und M3 (Mittelwerte aus je drei Prüfkörpern).....	44
Tab. 4.19:	Zeitliche Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 nach <i>Schmidt 2008</i>	45
Tab. 4.20:	Versuchsmatrix Entwicklung der Betondruckfestigkeiten über die Zeit von M1, M2 und M3 (Mittelwerte aus je sechs Prüfkörpern)	46
Tab. 4.21:	Lagerung der Probekörper – ohne Wärmebehandlung.....	48
Tab. 4.22:	Lagerung der Probekörper – mit Wärmebehandlung.....	49
Tab. 4.23:	Mittelwerte der 28 d-Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes	50
Tab. 4.24:	Vergleich dampfdicht verpackter (G) und ungeschützter (NG) Lagerung während der Wärmebehandlung.....	54
Tab. 4.25:	Gegenüberstellung der Karbonatisierungstiefen von M1, M1 _W (warmbehandelt), M2 und M3 nach 180 Tagen Lagerung unter Normklimabedingungen, Lagerung bei 2 % CO ₂ -Gehalt und Lagerung im Freien	61
Tab. 4.26:	Experimentell bestimmte Migrationskoeffizienten von M1, M2 und M3 ..	65

Tab. 4.27: Einzuhaltende Mittelwerte und größte zulässige Einzelwerte der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (in Anlehnung an <i>BAW 2012</i>)	65
Tab. 4.28: Weitere Materialkenngrößen Nanodur [®] -Beton (nach <i>durcrete 2011 c</i> und <i>durcrete 2014</i>).....	66
Tab. 5.1: Probekörpertypen	69
Tab. 5.2: Hoch aufgelöste Modellierung der Oberfläche der Betonkörper	73
Tab. 5.3: Erstarrungszeit von M1 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (<i>DIN EN 196-3</i>).....	80
Tab. 5.4: Erstarrungszeit von M2 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (<i>DIN EN 196-3</i>).....	81
Tab. 5.5: Erstarrungszeit von M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (<i>DIN EN 196-3</i>).....	81
Tab. 5.6: Gegenüberstellung der Frischbetontemperaturen von M1, M2 und M3.. ..	81
Tab. 5.7: Gegenüberstellung der Erstarrungszeiten von M1, M2 und M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (<i>DIN EN 196-3</i>)	82
Tab. 7.1: Verwendete Materialparameter.....	112
Tab. 7.2: Interceptfaktorbestimmung 18:00 Uhr.....	124
Tab. 7.3: Interceptfaktoren über den Tagesverlauf	125
Tab. 8.1: Versuchsübersicht Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme über die Zeit von M1, M2 und M3 bei unterschiedlichen Schalungsmaterialen.....	133
Tab. 8.2: Technische Daten Miro-Sun [®] weatherproof reflective 90 (<i>Alanod 2010</i> , <i>Alanod 2012</i> , <i>Alanod 2013 a</i> und <i>Alanod 2013 b</i>).....	141
Tab. 8.3: Technische Daten des verwendeten Konstruktionsklebstoffes	142
Tab. 8.4: Übersicht und Versuchsergebnisse Abreißprüfung.....	144

1 Einleitung

Im ersten Kapitel dieser Arbeit werden Motivation und Zielsetzung beschrieben. Anschließend wird das zugrunde liegende Forschungsvorhaben vorgestellt und die Gliederung der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation

Nach *DLR 2011* könnten mit kostengünstigem, sicherem und umweltfreundlichem Strom, der mittels konzentrierender Solarsysteme erzeugt wird, im Jahr 2050 etwa 15 % des europäischen Strombedarfs gedeckt werden.

Wenngleich dies möglicherweise auch zu optimistisch gegriffen ist, bieten solarthermische Kraftwerke in jedem Fall eine Zukunftsperspektive. Die Weiterentwicklung, Verbesserung und Kostensenkung dieses Systems erscheint daher durchaus lohnenswert.

Derzeit existieren mehrere Arten solarthermischer Kraftwerke:

- Parabolrinnenkraftwerke,
- Solarturmkraftwerke,
- Linear Fresnel – Kraftwerke,
- Paraboloidkraftwerke.

Parabolrinnenkraftwerke stellen nach *BINE 2008* die bislang kostengünstigste solarthermische Kraftwerksform dar.

Nach *Nava 2007 a* sind die Kollektorelemente hinsichtlich ihrer Kosten, ihres Platzbedarfs, ihrer benötigten Materialmenge und ihres Montageaufwands die dominierenden Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerks. Von wesentlichem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks ist daher die Kostenoptimierung der Fertigungskette für Kollektoren.

Aus diesem Grund ist die Motivation der vorliegenden Arbeit, die Realisierung der wirtschaftlich mit Abstand am erfolgreichsten solarthermischen Kraftwerksart unter Verwendung des Werkstoffs Beton für die Herstellung der Kollektorelemente zu ermöglichen. Dies soll erfolgen, indem die für die Wirtschaftlichkeit maßgebende Komponente durch Klärung zahlreicher wissenschaftlicher Fragestellungen verbessert wird.

Stand der Technik ist die Herstellung der Kollektorelemente als räumliches Stahlfachwerk.

Die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Idee, um eine weitere Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Parabolrinnenkraftwerken zu erzielen, ist die Ausführung der Kollektoren unter Verwendung des Werkstoffs Beton. Dieser Ansatz wird im Folgenden ausgearbeitet und bewertet.

1.2 Zielsetzung

Es ist zunächst eine hinsichtlich ihrer Formbeständigkeit, Festigkeiten, Erhärtungszeit, Verarbeitbarkeit und Schwindeigenschaften geeignete Betonrezeptur zu entwi-

ckeln. Die Beachtung all dieser Aspekte ist notwendig, um die Herstellung eines Kollektorelements aus Beton überhaupt zu ermöglichen.

Darüber hinaus muss die Realisierbarkeit eines Betonkollektors untersucht werden. Hierbei sind zahlreiche Fragestellungen, die von einem geeigneten Schalungskonzept bis zu einer praktisch umsetzbaren Verspiegelung reichen, zu bearbeiten. Dadurch sollen Erkenntnisse hinsichtlich der späteren Serienfertigung erlangt werden.

Schließlich ist der Betonkollektor mit bestehenden Systemen hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu vergleichen. Dies soll sowohl anhand von messtechnischen als auch simulationsbasierten Analysen erfolgen.

1.3 Zugrunde liegendes Forschungsvorhaben

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *„Leichte verformungsoptimierte Schalentragwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke“* erstellt.

Dieses ist ein Teilprojekt des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms *„Leicht Bauen mit Beton“ SPP 1542*.

Die Koordination dieses Schwerpunktprogramms lag in den Händen des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Dresden.

Die Bearbeitung des beschriebenen Teilprojekts erfolgte in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum, der die Projektleitung innehatte.

1.4 Gliederung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in neun Teile gegliedert:

- 1) In der Einleitung in Kapitel 1 wurde die Motivation der vorliegenden Arbeit bereits beschrieben sowie das zugrunde liegende Forschungsvorhaben vorgestellt.
- 2) Kapitel 2 hat die historische Entwicklung, das Funktionsprinzip und den Bau konventioneller Parabolrinnenkraftwerke zum Inhalt. So wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik von Parabolrinnenkraftwerken gegeben.
- 3) In Kapitel 3 werden das Verbesserungspotential des bestehenden Systems sowie die Entwicklung eines eigenen Konzepts für Parabolrinnenkollektorelemente beschrieben.
- 4) Ein Hauptbestandteil dieser Arbeit ist die Entwicklung einer für den Bau von Parabolrinnen geeigneten Betonrezeptur. Im vierten Kapitel ist die Bearbeitung der betontechnologischen Aspekte dargestellt.
- 5) In Kapitel 5 werden die durchgeführten Arbeiten bezüglich Schwindverformungen und Maßhaltigkeit sowie die nach der Herstellung des Großdemonstrators durchgeführte Genauigkeitsanalyse beschrieben.

- 6) Das sechste Kapitel hat die Erzeugung eines Rechenmodells als Basis der durchzuführenden Berechnungen bezüglich des Interceptfaktors (Definition siehe Kapitel 2.2.7) des Großdemonstrators zum Inhalt.
- 7) In Kapitel 7 werden die am Großdemonstrator durchgeführten numerischen Berechnungen erörtert. Es werden eine hinsichtlich des Schwindens optimierte Herstellgeometrie sowie die Beurteilung desselben durch Betrachtung seines rechnerischen Interceptfaktors unter realitätsnahen Bedingungen an einem geeigneten Standort aufgeführt.
- 8) Nach Durchführung der Berechnungen werden im achten Kapitel die konstruktive und bauliche Herstellung eines Großdemonstrators beschrieben.
- 9) Das neunte Kapitel schließt die Arbeit durch eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Berechnungen, den erhaltenen Ergebnissen sowie einen Ausblick ab.

2 Stand der Technik bestehender solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke

In diesem Kapitel werden die historische Entwicklung, das Funktionsprinzip und der Bau konventioneller Parabolrinnenkraftwerke erläutert. Der Fokus dieser Arbeit liegt hierbei stets auf den Kollektorelementen. Grund dafür ist, dass die Parabolrinnenkollektoren, wie oben bereits beschrieben, kostendominierendes Element und ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks sind. Um eine Rentabilitätssteigerung zu erzielen, ist es daher am effizientesten, diese mittels einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Kollektorelemente zu erreichen.

2.1 Übersicht Concentrated Solar Power-Systems

Im Folgenden wird eine Übersicht der heutzutage hauptsächlich existierenden solarthermischen Kraftwerke, sogenannter Concentrated Solar Power-Systems (CSP-Systems), gegeben (vergl. Abb. 2.1).

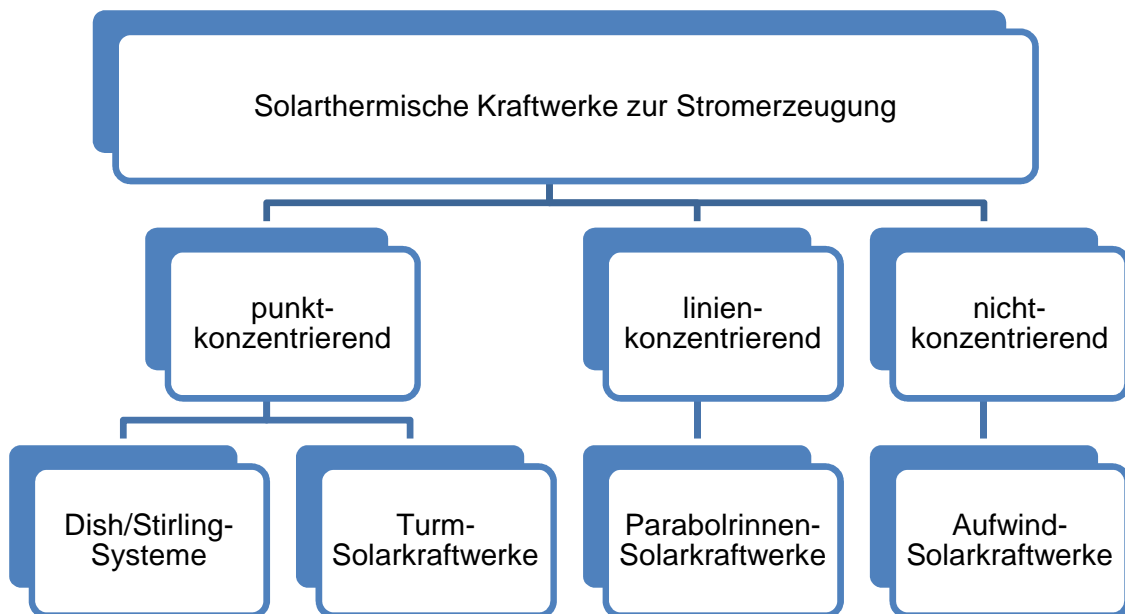


Abb. 2.1: Einteilung der solarthermischen Kraftwerke nach Schiel 2004

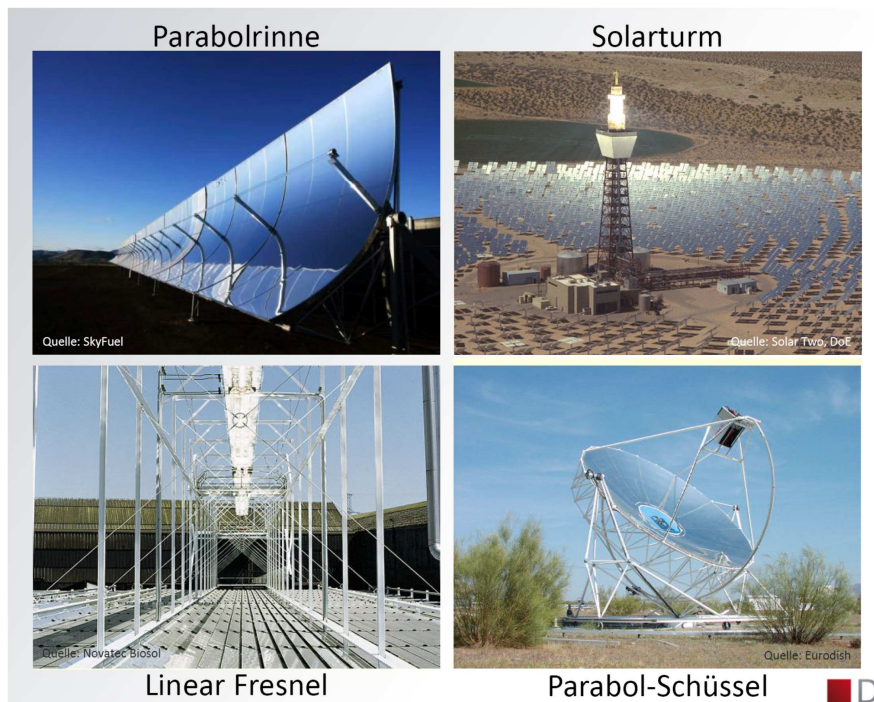


Abb. 2.2: Unterschiedliche Prinzipien der Solarkonzentration: Parabolrinnen-, Solarturm-, Linear Fresnel- und Paraboloidkraftwerk (Quelle: Breuer 2014)

Tab. 2.1: Vergleich unterschiedlicher Kraftwerkstypen zur solarthermischen Elektrizitätserzeugung nach Watter 2009 und BINE 2008

Kenngröße	Parabolrinne	Parabolrinne	Solarturm	Solarturm (REFOS)	Paraboloid
Leistung (solar) MW _{el}	5 – 200	5 – 200	5 – 200	5 – 200	0,01 – 0,1
Einsatz	Dampfturbine, ISCCS	Dampfturbine, ISCCS	Dampfturbine, ISCCS	Gasturbine, GuD-Kraftwerk	Gasturbine, Stirling Motor
Receiver / Absorber	Absorberrohr	Hochdruck-Absorberrohr	Rohrbündel o. drucklose volumetrische Receiver	Volumetrische Receiver	Rohrbündel o. Heat Pipe
Wärmeträger	Thermoöl	Dampf	Luft, Salz, Dampf	Luft	Luft, Helium, Wasserstoff
Spitzenwirkungsgrad [%]	18 – 21	20 – 23	18 – 23	ca. 30	20 – 29
Mittlerer Wirkungsgrad [%]	10 – 15	14 – 18	14 – 19	ca. 25	16 – 23
Betriebs-temperatur [°C]	300 – 400	400 – 500	600 – 800	800 – 1200	900 – 1200
Betriebsdruck [bar]	< 5	100 – 120	< 5	15 – 20	< 15
Status	kommerziell	Forschung und Entwicklung	Demonstration	Demonstration	Demonstration

ISCCS: Integrated Solar and Combined Cycle System

REFOS: Solar-Hybrid Gas Turbine-based Power Tower Systems,
Solar Receiver für fossile Gasturbinen und GuD-Anlagen

GuD: Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Da die vorliegende Arbeit ausschließlich Parabolrinnenkraftwerke zum Inhalt hat, wird diese Kraftwerksart im Folgenden umfassender beschrieben. Weiterführende Informationen zu den übrigen Solarkraftwerksformen finden sich beispielsweise in *Geyer 2002*, *Harte 2012*, *Harte 2013*, *Hoffschmidt 2009*, *Krätzig 2010*, *Laing 2002*, *Mohr 1999*, *Pitz-Paal 2002*, *Pitz-Paal 2004*, *Schiel 2004*, *Schlaich 1982* und *Watter 2009*.

2.2 Parabolrinnenkraftwerke

2.2.1 Historische Entwicklung

Im Folgenden werden die Entwicklungsgeschichte und Betriebserfolge von Parabolrinnenkraftwerken in Anlehnung an *Geyer 2002*, *Schiel 2012* und *Watter 2009* beschrieben:

- um 1880 Der Amerikaner John Ericsson treibt mittels eines Parabolrinnenkollektors eine Heißluftmaschine an.
- 1907 Dr. Wilhelm Meier aus Aalen und Adolf Remshardt aus Stuttgart melden ein Patent an, welches eine Vorrichtung zum Gegenstand hat, mittels derer Sonnenwärme zur Dampferzeugung in Parabolrinnenkollektoren verwendet werden kann (*Schiel 2011*).
- 1912 Konstruktion von Parabolrinnen mit einer Kollektorlänge von 62 m, einer Aperturweite von 4 m und einer Gesamtaperturfläche von 1200 m² für eine 45 kW Dampfmotorpumpe in Meadi, Ägypten, durch den Briten Frank Shumann und den Amerikaner C. V. Boys (*Schiel 2007*).
- 1916 Bewilligung von 200.000 Reichsmark für eine Parabolrinnen-Demonstration in Deutsch-Südwest-Afrika durch den Deutschen Reichstag. Die Realisierung des Plans scheiterte jedoch am Ersten Weltkrieg sowie an der Entdeckung von Erdöl in Nahost.
- 1977-1982 Installation von fast 10.000 m² Parabolrinnensystem der Firma Acurex für die Parabolrinnen-Prozesswärme-Demonstrationsanlagen in den USA. Von 1984 bis 1991 wurde die Anlage SEGS (Solar Electricity Generation System, SEGS) in der Mojave-Wüste in Südkalifornien, USA kommerziell betrieben. Mittels neun dieser Kraftwerke der Typen LS-1, LS-2 und LS-3 mit einer Leistung von je 15 bis 80 MW wurde insgesamt eine Stromerzeugungskapazität in Höhe von 354 MW auf über 2 Millionen Quadratmetern Parabolrinnenkollektoren realisiert.
- 1981 Inbetriebnahme einer Demonstrationsanlage mit 500 kW elektrischer Leistung auf der Plataforma Solar de Almería in Spanien. Nach *Schiel 2012* beträgt die solare Einstrahlung an diesem Standort 2.100 bis 2.200 kWh/m²/a.

- 1983 Inbetriebnahme der ersten privat finanzierten Prozesswärmanlage mit 5.580 m² Parabolrinnenkollektorfläche in Chandler, Arizona, USA. Eingesetzt wurde die Anlage von einem kupferverarbeitenden Betrieb, um zur Beheizung von dessen Elektrolyttanks thermische Energie zu erzeugen und zu speichern.
- 2007 Das Kraftwerk Solar One geht mit einer Leistung von 64 MW in Boulder City, Nevada, USA, ans Netz. Sein Wirkungsgrad wird mit 14 % angegeben.
- 2008 Nach zweijähriger Bauzeit geht Europas derzeit größtes Solarkraftwerk Andasol 1 in Betrieb. Es umfasst 510.000 m² Spiegelfläche, die aus 624 Rinnen (je 150 m lang und 5,5 m breit) gebildet wird. Seine Leistung beträgt 50 MW_{el}. Pro Jahr sollen 178 Mio. kWh Strom erzeugt werden, was den häuslichen Energieverbrauch von etwa 200.000 Menschen deckt (*BINE 2008*).
- 2009 Andasol 2
- 2010 Andasol 3

Heutige Parabolrinnenkraftwerke haben nach *Geyer 2002* eine Leistung von 10 bis 1.000 MW, nach *Schiel 2004* sind es 50 bis 100 MW und nach *Schiel 2012* erzeugen sie eine Leistung von 50 bis über 200 MW und zählen damit zu den solaren Großkraftwerken.

Es existieren unterschiedliche Kollektorkonzepte, die derzeit verfolgt werden. Nach *Schiel 2011* sind dies die in Abb. 2.3 dargestellten.

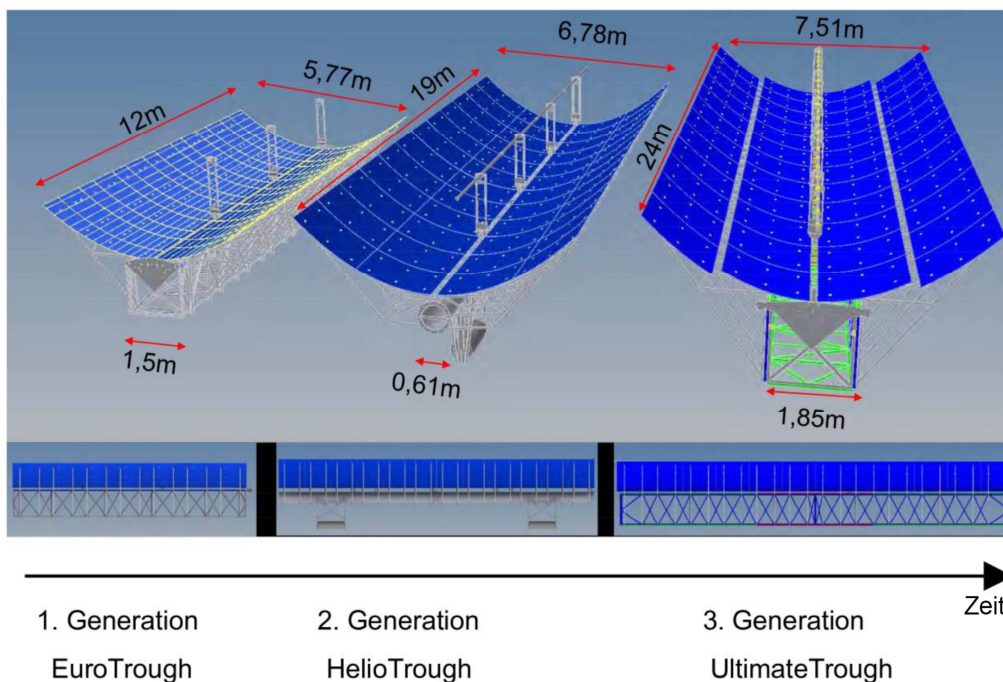


Abb. 2.3: Gegenüberstellung der drei derzeitigen Parabolrinnengenerationen (Quelle: *Schiel 2011*, mit eigenen Ergänzungen)

In der nachfolgenden Tab. 2.2 ist der zeitliche Entwicklungsablauf der drei unterschiedlichen Kollektorelemente dargestellt.

Tab. 2.2: Übersicht der drei Parabolrinnengenerationen nach Schiel 2011 und Schiel 2012

		EuroTrough 1. Generation	HelioTrough 2. Generation	UltimateTrough 3. Generation
Technologie- entwicklung	Entwicklungs- beginn	1998	2005	2009
	Prototyp	PSA, Spanien 1998	Dortmund 2006	Köln 2011
	Test Loop *)	EuroTrough Loop KJC: Kramer Junc- tion, USA, 2003	HelioTrough Loop KJC, Kramer Junc- tion, USA, 2010	UT Collector Trough Loop, Harper Lake, USA, 2012
Kommerzielle Anwendung	Großmaßstäb- liche Kraft- werksprojekte	- 50 MW Andasol I, II, III: Aldeire, Span- ien, 2008, 2009, 2012 - 50 MW Kraftwerk Moron, Spanien, 2011 - 50 MW Kraftwerk Astexol, Badajoz, Spanien, 2012 - 50 MW Kraftwerk Extremasol, Badajoz, Spanien, 2012 - 125 MW Kombi- niertes Kraftwerk, Kuraymat, Ägypten, 2010	4 x 250 MW Blythe, Kalifornien, USA, 2014	bisher noch nicht großmaßstäblich umgesetzt
Kenndaten	Aperturfläche einer Kollekt- oreinheit	818 m ²	1247 m ²	1689 m ²
	Aperturweite	5,8 m	6,8 m	7,5 m
	Brennweite	1,71 m	1,71 m	1,71 / 1,88 m
	Kollektorlänge	148 m	188 m	242 m
	Länge eines Kollektor- elements	12 m	19 m	24 m
	Anzahl Kollekt- tor-elemente pro Antrieb	12 Stck.	10 Stck.	10 Stck.
	Absorberrohr- durchmesser	70 mm	90 mm	95 mm
	Konzentration- sfaktor	82:1	76:1	80:1

*) Test Loop: Kleinmaßstäbliches Kraftwerk zu Testzwecken

In Abb. 2.4 werden einige Beispiele von unterschiedlichen bisher gebauten Kollektortypen gezeigt.



Abb. 2.4: Beispiele verschiedener Kollektorkonzepte
 Oben: LS3-Kollektor mit Raumfachwerk, unten links: Eurotrough mit Torsionskasten, unten rechts: SL4600 mit Torsionsrohr
 (Quelle: <http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/solare-waerme/publikation/solarthermische-kraftwerke-2/parabolrinnen-kollektortechnik/>, zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)

2.2.2 Funktionsprinzip

Bei Parabolrinnenkollektoren handelt es sich um konzentrierende Solarkollektoren, die der Sonne nachgeführt werden und in größeren Solarsystemen eingesetzt werden. Wie in *Solar Millennium 2014* beschrieben besteht ein Parabolrinnenkraftwerk mit thermischem Speicher aus drei Hauptkomponenten: Dem Solarfeld, dem Speichersystem und dem Powerblock mit Turbine, Generator und Kühlungskreislauf.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Kollektorelementen.

Wie in Abb. 2.5 veranschaulicht wird das Sonnenlicht von der Oberfläche einer einachsigen parabolisch gekrümmten Spiegelfläche reflektiert und auf ein Absorberrohr nach Nava 2007 a 80-fach konzentriert, welches entlang der Brennpunktlinie des Spiegels angebracht ist. Nach Schiel 2012 liegen typische Konzentrationsfaktoren bei 70 bis 100. Diese gerade Brennpunktlinie liegt im idealen Fokus des parabolischen Zylinders und wird als Fokallinie bezeichnet.

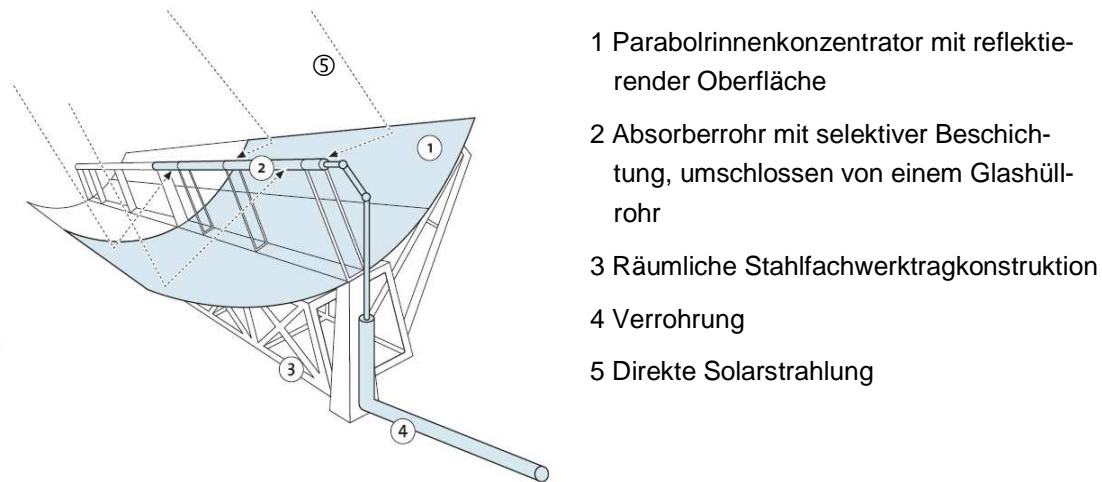


Abb. 2.5: Funktionsprinzip der Strahlungssammlung bei einer Parabolrinne
(Quelle: *Solar Millenium 2011*)

Durch das Absorberrohr wird ein Wärmeträgermedium gepumpt. In der Regel handelt es sich um ein synthetisches Thermoöl (Heat Transportation Fluid, HTF), welches durch die stark konzentrierte Solarstrahlung bis auf circa 400 °C erhitzt wird. Es finden jedoch auch Salzschnmelzen Verwendung. Die Flussdichte der Sonnenstrahlung an der Absorberrohroberfläche kann das etwa 100-fache der Einstrahlung betragen. Ziel ist es, möglichst hohe Wirkungsgrade bei den Betriebstemperaturen zu erreichen. Hierzu sind die Absorberrohre zum einen beschichtet, zum anderen werden sie von einem konzentrischen evakuierten äußeren Glasrohr umhüllt, in welchem zur Isolation und damit zur Vermeidung von Wärmeverlusten ein Vakuum erzeugt wird. Die gesamte Komponente, bestehend aus dem Stahlrohr und dem Glasrohr wird Receiver genannt. Weiterführende Informationen zum komplexen Thema der Absorberrohre werden zum Beispiel in *Bartelmeß 2013*, *Benz 2007*, *Gnädig 2013*, *Ruegger 2013*, *Sohr 2013*, und *Schott 2014* gegeben.

Absorberrohr und Spiegel werden der Sonne aus Kostengründen einachsrig, in der Regel hydraulisch, nachgeführt. Aus diesem Grund werden die Parabolrinnen in Nord-Süd-Richtung angeordnet, um der Sonne im Tagesverlauf von Ost nach West nachgeführt werden zu können. Nach *Geyer 2002* sollte die Symmetrieebene der Parabel mit einer maximalen Abweichung zur Sonne von etwa 0,04 ° ausgerichtet werden können.

Die Länge eines Kollektorelements misst 12 m. Bei der Plataforma Solar de Almería werden beispielsweise zwölf dieser torsionssteifen Kollektorelemente aneinander gekoppelt und die 144 m lange Einheit wird durch eine einzige Antriebseinheit der Sonne nachgeführt (*Schiel 2004*). *Watter 2009* gibt die Kollektorlänge je nach Bautyp mit 20 bis 150 m an. Die einzelnen Kollektorelemente werden hintereinander geschaltet und bilden dadurch mehrere hundert Meter lange Stränge, sogenannte Loops.

Das beim Durchströmen der Absorberrohre erhitzte Öl einer großen Anzahl dieser Loops wird gesammelt, bevor es zentral einem Dampferzeuger zugeführt wird. Diesem ist eine konventionelle Dampfturbine mit Generator nachgeschaltet. Der Dampfeintritt erfolgt mit ungefähr 370 °C bei etwa 100 bar (vergl. Abb. 2.6).

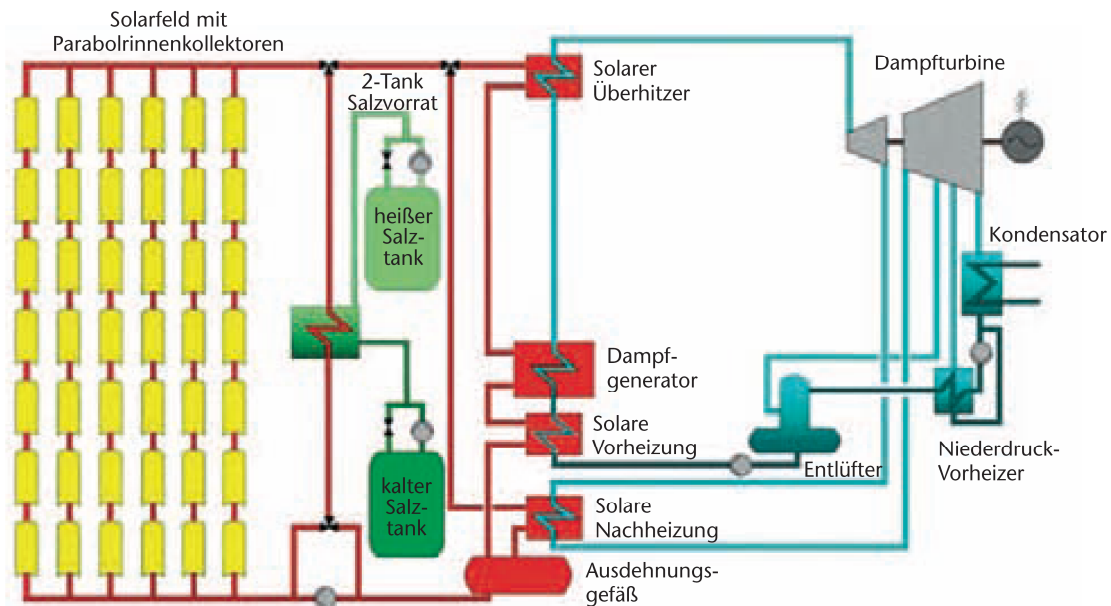


Abb. 2.6: Funktionsschema eines solarthermischen Parabolrinnenkraftwerks (Quelle: Nava 2007 a)

Der Thermoölkreislauf wird quasi drucklos betrieben. Der Vorteil dabei ist, dass nicht die gesamte Anlage als „Druckbehälter“ ausgelegt werden muss (Geyer 2002, Schiel 2004 und Watter 2009).

Bei anderen Konzepten fungiert überhitzter Wasserdampf als Wärmeträgermedium (BINE 2011). So wird bei der Direktdampferzeugung (Direct Solar Steam, DISS) kein Wärmeüberträger benötigt, der benötigte Wasserdampf wird direkt in den Absorberrohren erzeugt und ermöglicht Temperaturen von über 500 °C. Auch bei dieser Methode wird der Wasserdampf in eine zentral angeordnete konventionelle Dampfturbine eingeleitet, welche an einen Generator gekoppelt ist. Diese konventionelle, relativ leicht verfügbare Technik birgt große Vorteile insbesondere hinsichtlich eines Einsatzes in Entwicklungsländern (Watter 2009).

2.2.3 Kosten

Die auf die Spiegelfläche bezogenen Solarfeldkosten eines Parabolrinnenkraftwerks nach derzeitigem Stand der Technik werden in Lerchenmüller 2004 mit 220 €/m² beziffert. In Lerchenmüller 2004 wird jedoch auch von einem erheblichen Kostensenkungspotenzial berichtet. Eine Möglichkeit hierfür sei die Massenfertigung. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher die Herstellung von Parabolrinnenfeldern zurzeit gebauter solarthermischer Kraftwerke betrachtet, insbesondere die Kollektorfertigung und -montage.

2.2.4 Bau von Parabolrinnenfeldern solarthermischer Kraftwerke

Übliche Parabolrinnenkollektoren für großmaßstäbliche solarthermische Kraftwerke bestehen aus räumlichen, filigranen Stahlfachwerkstrukturen, auf denen gebogene Spiegelsegmente punktförmig aufgelagert werden. Da die Konstruktion und Robustheit der Kollektorelemente entscheidend für den Wirkungsgrad, die Lebensdauer sowie die Kosten eines Parabolrinnenkraftwerks sind, wird nach Feuerverzin-

ken 2006 häufig aus Rentabilitätsgründen ein wartungsfreier und langlebiger Korrosionsschutz in Form einer Feuerverzinkung angewendet.

Nach Nava 2007 a ist die Montagelinie zur Fertigung der Kollektorsegmente die Hauptkomponente der kostenoptimierten Fertigungskette für Parabolrinnenkollektoren. Diese wird auf der Baustelle installiert. In ihr wird die optische Präzision der Kollektoren mittels so genannter Montagehellinge erreicht (vergl. Abb. 2.7).

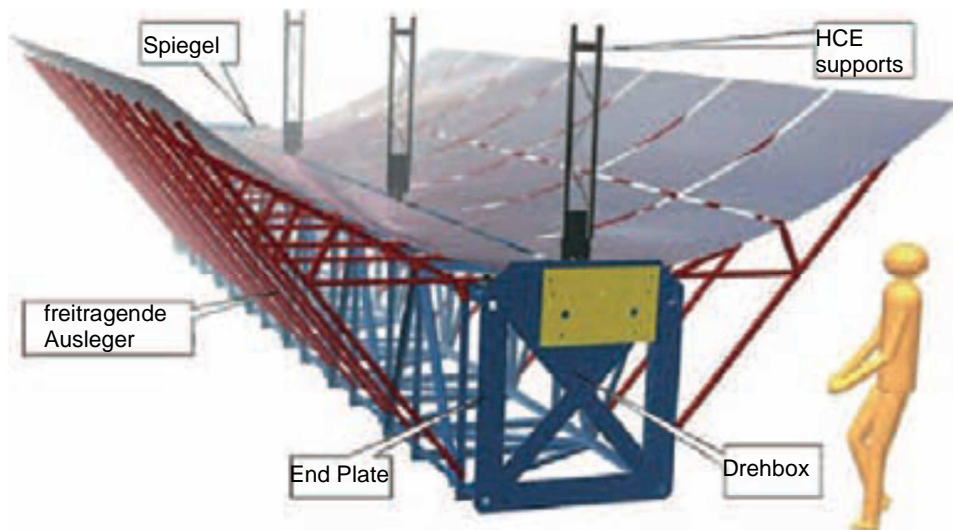


Abb. 2.7: Drei Einstellvorrichtungen zur Serienfertigung von Parabolrinnenkollektoren (Quelle: Nava 2007 a)

Am Beispiel von Andasol 1, welches auf der in der südspanischen Provinz Granada gelegenen Hochebene von Guadix gebaut wurde, soll nach Nava 2007 a die derzeit bestehende und zumindest nicht zu überschreitende Zeitvorgabe, die beim Bau eines Parabolrinnenkraftwerks besteht, dargestellt werden. Die insgesamt für Andasol I benötigte Bauzeit betrug 24 Monate. In zwei parallelen Montagelinien wurden hochpräzise Montagegestelle oder Einstellvorrichtungen, sogenannte Jigs, auf der Baustelle installiert. Die entscheidenden Geometriepunkte sind die Montagepunkte der Spiegel relativ zur Kollektordrehachse und werden in den Jigs exakt fixiert. Die aus Kostengründen mit relativ großen Toleranzen ausgeführten, feuerverzinkten Stahlteile wurden mittels hochfester Schraubverbindungen in diesen Jigs gefügt, deren hohe Präzision sich hierdurch auf die Kollektoren abformte (vergl. Abb. 2.8).



Abb. 2.8: Einstellvorrichtungen (Jigs) für die Serienfertigung von Kollektorelementen
(Quelle: Nava 2007 a)

Die Kollektorfläche von Andasol 1 umfasst 510.000 m² und ist damit die derzeit weltweit größte. Durch die Nutzung der zwei parallelen Montagelinien zur Serienfertigung der Kollektorsegmente konnten die rund 7.500 benötigten Kollektorelemente in etwa 10 Monaten produziert werden: Die Zieltaktzeit der Linie betrug eine Stunde je Kollektorelement. Jede Linie kann in einer 8-Stunden-Schicht also 8 Segmente produzieren. Bei Betrieb der Linie im Zwei-Schichtbetrieb waren dies 16 Segmente am Tag. Die erreichte Produktionsrate der beiden Linien lag insgesamt bei 32 bis 36 Stück je Tag. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Montagelinie dauerten rund sechs Monate.

Die Genauigkeit der Spiegelfläche und das Einhalten der Toleranzen der Parabelgeometrie sind entscheidend für die Sicherung des energetischen Ertrags des Solarfelds und damit für den Wirkungsgrad des Kraftwerks. Die Vermessung der gefügten Stahlstruktur ist aus diesem Grund die wichtigste Qualitätssicherungsmaßnahme. Sie erfolgt durch ein auf Photogrammetrie basierendem 3D-Messsystem berührungslos und automatisiert (Burgess 2009).

In die beim Bau von Andasol I verwendeten Montagelinien wurde eine photogrammetrische Messeinrichtung integriert. Diese ermöglichte das Erkennen von Montagefehlern und deren Korrektur noch während des Produktionsprozesses. Die Koordinaten der Spiegelaufnahmepunkte wurden messtechnisch ermittelt und dahingehend überprüft, ob es möglich war, die Spiegel spannungsfrei auf diesen zu montieren und ob die Winkelfehler zwischen den Auflagepunkten die zulässigen Toleranzen nicht überschritten (vergl. Abb. 2.9). Weitere Details zur Vermessung von Parabolrinnen sind in Kapitel 5 beschrieben.

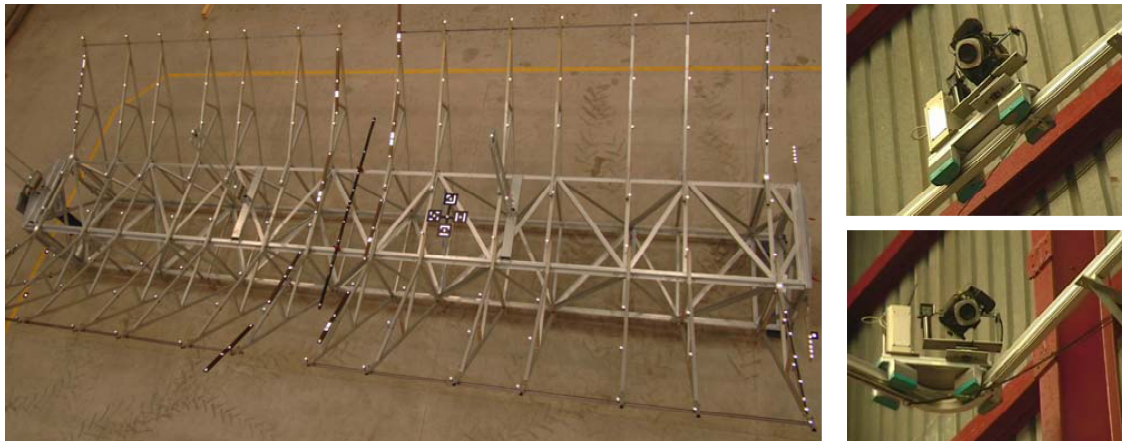


Abb. 2.9: Vermessung in der Montagelinie mittels Photogrammetrie, links: Kollektorstruktur mit Zielmarken bei der 3D-Messung, rechts: Kamera-Shuttle auf dem Schienensystem (Quellen: Pottler 2007 und Ulmer 2007)

Die Fertigung der Kollektorsegmente wird durch die Spiegelmontage abgeschlossen. Nach ihrer Fertigstellung in der Feldfabrik werden die Kollektorelemente an ihre Bestimmungsposition im Solarfeld transportiert. Dort werden sie auf Fundamente gesetzt und an die Nachführantriebe montiert. Nachdem die Absorberrohre und die Feldverrohrung montiert sind, ist das Kollektorfeld betriebsbereit (vergl. Abb. 2.10).



Abb. 2.10: Transport eines montierten Kollektorsegments in das Solarfeld und anschließende Montage (Quellen: rechts: Nava 2007 a, unten: <http://paul-langrock.de/docs/andasol.htm>, zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)

2.2.5 Standorte

Mit Einschränkungen im Äquatorialgürtel liegen zwischen dem nördlichen und südlichen 35. Breitengrad ein hoher Anteil direkter Sonneneinstrahlung und somit geeignete Bedingungen für Standorte von Parabolrinnenkraftwerken vor (vergl. Abb. 2.11). Die solarthermische Stromerzeugung ist nur innerhalb dieses sogenannten Sonnengürtels der Erde wirtschaftlich sinnvoll. Ausschließlich direkte Sonneneinstrahlung kann mit Spiegelsystemen fokussiert und für die Erzeugung solarthermischen Stroms genutzt werden. Vergleichbare Einstrahlungsbedingungen in Europa finden sich im

Süden Spaniens, Portugals, Italiens und Griechenlands sowie auf Malta und Zypern (BINE 2008).

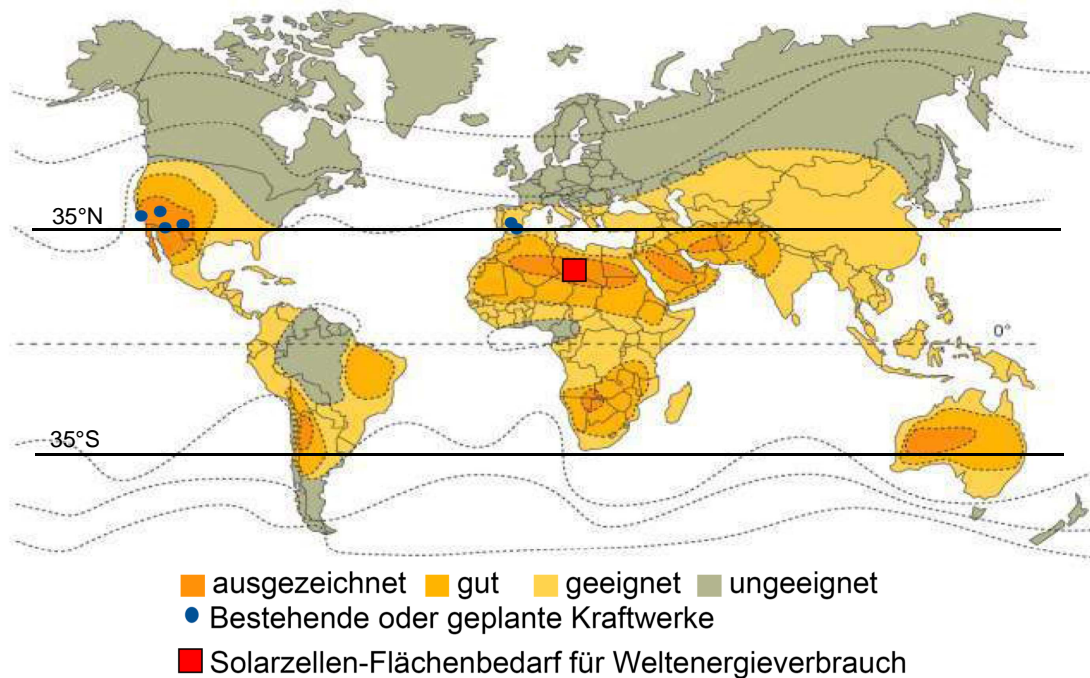


Abb. 2.11: Geeignete Standorte für solarthermische Kraftwerke (Quelle: Konz 2014)

Nach *Hug 2007* können auf einem Quadratkilometer Wüste pro Jahr etwa 250 Gigawattstunden Strom produziert werden. Dieser Wert ist das 250-fache dessen, was jährlich aus einem Quadratkilometer Biomasse geerntet werden kann und das fünffache der Leistung der besten heutigen Windkraftanlagen und Wasserkraftwerke. Bildlich veranschaulicht kommt auf einer Fläche von 6.000 Quadratkilometern, was der Größe des Nasser-Stausees in Ägypten entspricht, die gleiche Energiemenge in Form von Sonnenenergie an wie sie im Nahen Osten derzeit in Form von Öl gefördert wird, nämlich 9 Milliarden Barrel.

Um die verschiedenen Kollektortypen hinsichtlich ihrer Monats- und Jahreserträge zu vergleichen, wird in *Geyer 2002* als „Referenzstandort“ Hurghada, Ägypten (27,14° Nord, 33,51° Ost) genannt.

Haque 2005, *Haque 2006* und *Haque 2008* haben zum Inhalt, die in Afrika und in der arabischen Golfregion vorherrschenden Umwelteinflüsse und daraus resultierende Anforderungen an Beton zu formulieren.

Aufgrund der Möglichkeit, vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) umfassende meteorologische Daten für den Standort Plataforma Solar de Almería (PSA) in der südostspanischen Provinz Almería in der Nähe der Wüste von Tabernas zu beziehen, wird dieser Standort im Rahmen dieser Arbeit für alle im Folgenden durchgeführten Simulationen zu Grunde gelegt (vergl. Kapitel 7).

2.2.6 Lebensdauer

Nach Geyer 2002 beträgt die geplante technische Nutzungsdauer eines Parabolrinnenfeldes 25 Jahre. Die tatsächliche Lebensdauer liegt erwartungsmäßig jedoch darüber. Für Beton stellt eine solche Lebensdauer keinerlei Herausforderung dar. Sie beträgt bereits bei Stahlbeton ein weitaus höheres Maß und kann durch Verwendung einer nicht-rostenden Bewehrung noch weiter gesteigert werden. Über weitergehende Untersuchungen zur Lebensdauersimulation von Betontragwerken wird beispielsweise in Ahrens 2011 berichtet.

Die bei den oben beschriebenen SEGS-Kraftwerken in Südkalifornien gesammelten Betriebserfahrungen ergaben einen Bruch von weniger als 1 % der Solarreflektoren pro Jahr, wobei diese auch Wüstenstürmen standhalten müssen. Dieses Kriterium müsste auch von Betonkollektoren erfüllt werden.

Eine Leistungsminderung der Originalspiegel war auch nach einer Betriebsdauer von mehr als 10 Jahren nicht zu verzeichnen. In *Solar Millennium 2011* beschriebene, an in der kalifornischen Mojave-Wüste stehenden Kraftwerken durchgeführte Messungen ergaben, dass auch nach über 20 Jahren kaum Qualitätseinbußen nachweisbar waren. Dieser Punkt ist unabhängig von der den Spiegel tragenden Unterkonstruktion und eine von den jeweiligen Spiegelherstellern zu lösende Aufgabenstellung.

2.2.7 Wirkungsgrad

Allgemein ist der Wirkungsgrad ein Maß, um die Effizienz von Energieumwandlungen und Energieübertragungen zu quantifizieren. Die definitionslose Größe beschreibt das Verhältnis der Nutzleistung zur zugeführten Leistung.

Im Fall der solarthermischen Kraftwerke wird zwischen dem optischen und dem thermischen Wirkungsgrad unterschieden.

Der Systemgesamtwirkungsgrad besteht aus einem optischen und aus einem thermischen Anteil. Wird das Arbeitsfluid einer Anlage auf Umgebungstemperatur aufgeheizt, ist der optische Wirkungsgrad gleich dem thermischen Wirkungsgrad. Im vorliegenden Fall der Parabolrinnenkraftwerke, bei denen das Wärmeträgermedium mit einer Betriebstemperatur von etwa 400 °C die Temperatur seiner Umgebung um ein Vielfaches übersteigt, kommt es zu thermischen Verlusten. Der thermische Wirkungsgrad ist also geringer als der optische Wirkungsgrad.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen beschränken sich auf den Interceptfaktor. Dieser gibt als geometrische Größe an, wieviel Prozent der reflektierten Sonnenstrahlen auf das Absorberrohr treffen. Weitere im Rahmen dieser Arbeit nicht zu untersuchende Faktoren sind die Reflektivität der Spiegel und die optischen Eigenschaften des Absorberrohrs. Da diese nicht durch die Genauigkeit der Betonschale beeinflusst werden, erfolgt im Weiteren die Beschränkung auf den Interceptfaktor.

3 Neues Konzept von Parabolrinnen aus hochfestem Beton – Entwicklung eines Großdemonstrators

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Idee zur Herstellung von Kollektorelementen solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke aus hochfestem Beton beschrieben.

So wird zunächst das Verbesserungspotential von Kollektorelementen nach aktuellem Stand der Technik aufgezeigt. Anschließend wird ein eigenes Konzept für einen Großdemonstrator aus hochfestem Beton unter Beschreibung des neuartigen Konstruktionsprinzips vorgestellt. Darauf folgend wird die Geometrie des Großdemonstrators entwickelt, bevor als letzter Punkt ein CAD-Modell desselben generiert wird.

3.1 Verbesserungspotential bestehender Kollektorelemente

Wie unter anderem in *Müller 2013 b* beschrieben bieten derzeit bestehende Kollektorelemente von Parabolrinnenkraftwerken deutliches Verbesserungspotential:

Die Montage des räumlichen Stahlfachwerks ist zeitaufwendig und somit kostenintensiv. Das Gleiche gilt für die Spiegelmontage und die anschließende Einmessung der Spiegel.

Die punktgestützten Spiegel weisen eine eher geringe Eigensteifigkeit auf, was zu Deformationen infolge von Eigen- und Windlasten führt. Bei den hier betrachteten Parabolrinnen ist es stets das Ziel, Verformungen der Spiegelfläche weitestgehend zu vermeiden. Der Grund hierfür ist, dass der Wirkungsgrad des Systems sinkt, wenn die Spiegelfläche merklich von der Form der idealen Parabel abweicht, da dann reflektierte Sonnenstrahlen am Absorberrohr vorbei gelenkt werden.

Geeignete Standorte für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke sind in der Regel Wüstengebiete. In vielen von diesen herrschen korrosive Umgebungsbedingungen vor. Häufig finden sich beispielsweise salzhaltige Böden vor, welche zur Verringerung der Lebensdauer einer Stahlstruktur führen können.

Schiel 2012 beschreibt die zentrale Bedeutung der Montagekosten und der Verringerung von auf der Baustelle zu fügenden Bauteilen. Diese Aspekte waren bereits für den Entwicklungsschritt von der Kollektorgeneration zwei zur Generation drei maßgebende Kriterien. Die weitere Montageprozessautomatisierung und eine Vereinheitlichung der einzelnen Bauelemente werden aufgrund des Kosteneinsparungspotentials ebenfalls weiterhin verfolgt.

All diese verbesserungsfähigen Punkte führten zu der Idee, innovative Parabolrinnenkollektorelemente aus Beton zu entwickeln. Da die Wirtschaftlichkeit der Kollektorelemente einen entscheidenden Faktor für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Parabolrinnenkraftwerks darstellt, erschien es lohnend, bei dieser Komponente eine Verbesserung zu erzielen.

3.2 Konzept innovativer Kollektorelemente aus Beton

An der Technischen Universität Kaiserslautern und der Ruhr-Universität Bochum kam die Idee auf, die für solarthermische Kraftwerke erforderlichen Parabolrinnen nicht länger aus Stahl zu fertigen, sondern stattdessen eine neuartige Generation

von Kollektorelementen zu entwickeln, welche auf einer Ausführung mit Beton als Werkstoff basieren.

Das im Folgenden vorgestellte Konzept, welches durch Entwurf, Simulation und bauliche Umsetzung eines Großdemonstrators ganzheitlich verfolgt wurde, enthält zwei innovative Aspekte: Zum einen ist dies die Verwendung des Werkstoffs Beton, zum anderen das neuartige, patentrechtlich geschützte Auflagerungskonzept (*Weißbach 2012*).

3.2.1 Verwendung des Werkstoffs Beton

Es wurde eine alternative Tragstruktur unter Verwendung des Werkstoffs Beton entwickelt. Diese zeichnet sich durch eine hohe Formbeständigkeit sowie Dauerhaftigkeit bei einem gleichzeitig minimalen Materialeinsatz aus. Zusätzlich dazu sind die Herstellkosten zu minimieren.

Frei formbarer Hochleistungsbeton ist ein sehr gut geeigneter Werkstoff, um einen konkurrenzfähigen, eigenständigen und innovativen Lösungsansatz zu formulieren.

3.2.2 Neuartiges Auflagerungskonzept und Antrieb

Bei bestehenden Parabolrinnensystemen erfolgt die Aufhängung der Rinne in ihrem Schwerpunkt. Der Aufhängepunkt dient dann als Drehpunkt, um den rotierend die Rinne der Sonne über deren Tagesgang nachgeführt wird.

Ein solches Auflagerungskonzept hat den Nachteil, dass ein großer Kraftaufwand für die Rinnenrotation erforderlich ist. Der Grund ist die große Menge aufzubringender kinetischer Energie, die erforderlich ist, um den Schwerpunkt der Parabolrinne nach oben und nach unten zu bewegen. Dieser Effekt ist bereits bei den leichten herkömmlichen Parabolrinnen vorhanden und verstärkt sich bei der höhergewichtigen Betonschale.

Aus diesem Grund wurde ein alternatives Auflagerungskonzept entwickelt (*Weißbach 2012*) und bei dem hier entwickelten und vorgestellten Großdemonstrator umgesetzt.

So wird die Parabolrinne nicht in ihrem Schwerpunkt drehbar aufgehängt, sondern über zwei Auflager abgerollt. Der Kraftaufwand zum Drehen der Schale, welcher erforderlich ist, um diese der Sonne nachzuführen, ist sehr gering. Der Grund hierfür liegt in der Auflagergeometrie. Diese ist so gewählt, dass der Schwerpunkt der Schale unabhängig von der Stellung der Parabolrinne immer auf der gleichen Höhe liegt (vergl. Abb. 3.1).



Abb. 3.1: Innovatives Auflagerungskonzept (Computeranimation: Firma solarsolid)

Das hier angewandte Auflagerungsprinzip unterscheidet sich auch deutlich von dem in *Bader 2011* vorgestellten (vergl. Abb. 3.4), welches auf Rollenlagern basiert. Die Rotation der Parabolrinne erfordert dabei deutlich mehr kinetische Energie, da die Schwerachse der Parabolrinne nicht wie bei dem hier beschriebenen und verfolgten Konzept auf derselben Höhe bleibt.

Der Großdemonstrator wurde mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet. Dieser erlaubt die automatische Ansteuerung des jeweils optimalen Winkels und ist zusätzlich mit einem Drehzahlregler ausgestattet, um die Geschwindigkeit manuell steuern zu können. Aufgrund des außerordentlich geringen zur Rotation der Rinne benötigten Kraftaufwandes genügen zwei 12 V Torantriebe mit Endschalter, die von einem 12 V Bleigelakku gespeist werden.

Für alle Stahlteile wurde nichtrostender Edelstahl verwendet.

3.2.3 Geometrie des Großdemonstrators

Das Konzept des im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Großdemonstrators orientiert sich hinsichtlich Geometrie und Verspiegelungskonzept an dem bestehenden System des Kollektortyps PTC 1800 der Firma Solitem.

Dieser wurde nach *Janotte 2009*, *Krüger 2007* und *Krüger 2008* im Projekt REACT (Self-sufficient Renewable Energy Air-Conditioning system for Mediterranean countries) auf dem Prüfstand Solare Prozesswärmeanwendungen (Sopran) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln-Porz bereits umfassenden Tests hinsichtlich seiner thermischen Leistungsfähigkeit unterzogen (vergl. Abb. 3.2).



Abb. 3.2: PTC 1800-Kollektor auf dem DLR-Prüfstand Sopran in Köln-Porz
(Quelle: Janotte 2009)

3.3 Abgrenzung zu bestehenden Systemen

Nachdem die Idee entstanden war und mit der Umsetzung begonnen wurde, ergaben die Recherchen, dass noch keine reinen Betonkollektoren in der hier geplanten Form existieren.

Der einzige Anwendungsfall von Beton beim Bau eines Solarkollektors ist in *Bader 2009*, *Bader 2011* *Hug 2013* und *Pedretti 2013* beschrieben. In einer Kooperation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich und der Schweizer Firma Airlight Energy Holding SA wurde ein Prototyp gebaut, bei dem die Stahlkonstruktion durch Betonfertigteile ersetzt wurde. Seine Länge misst 49,40 m, seine Aperturweite – also die Öffnungsbreite der Parabel – 7,90 m (vergl. Abb. 3.3).



Abb. 3.3: Prototyp eines Betonkollektors mit pneumatischen Polymerspiegeln in Biasca, Schweiz
(Quelle: <http://www.pre.ethz.ch/research/projects/?id=airlight>, zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)

Bei diesem Konzept werden die pneumatischen Polymerspiegel auf einem rechteckförmigen Rahmen aus vorgespannten Betonfertigteilen aufgelagert. Durch Aufbringen eines Überdrucks von wenigen Millibar werden zwei einander gegenüber liegende, zylindrisch gekrümmte Oberflächen erzeugt. Die der Sonne zugewandte Seite besteht aus einer selbstreinigenden, kratzfesten und UV-resistenten transparenten ETFE-Folie, die dem Boden zugewandte aus einem silikonbeschichteten Glasfasergewebe mit einer Aluminiumspiegeloberfläche. Der schematische Aufbau dieses Kollektors ist in der folgenden Abb. 3.4 dargestellt:

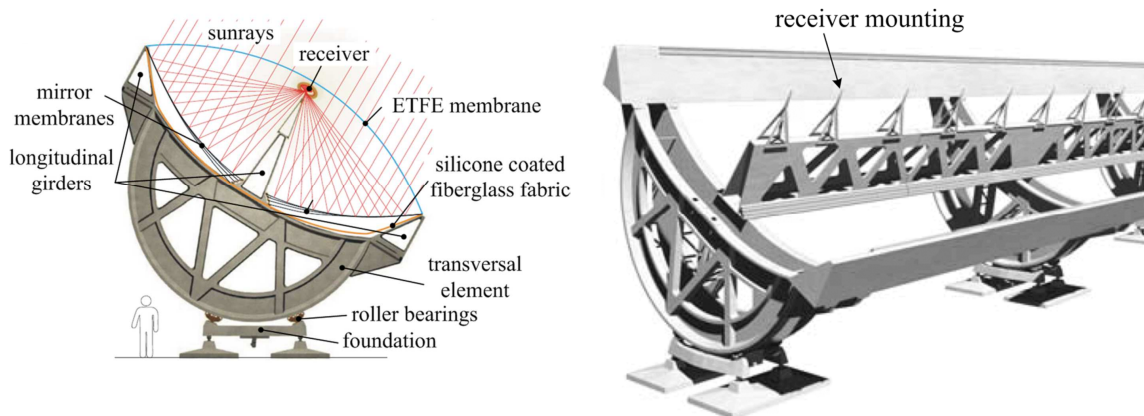


Abb. 3.4: links: Spiegelauflegerkonstruktion aus Betonfertigteilen, rechts: Auflagerungskonzept mittels Rollenlagern (Quelle: *Bader 2011*)

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz unterscheidet sich durch Folgendes von dem oben dargestellten bereits gebauten Betonkollektor:

filigrane Betonschale mit geringstmöglicher Wandstärke anstelle eines extrem massigen Kollektorelements enormer Ausmaße,

keine Vorspannung,

neuartige, patentrechtlich geschützte Auflagerungskonstruktion (*Weißbach 2012*),

Verschmelzen von Spiegelfläche und tragender Unterkonstruktion (Der Beton soll nicht nur als Auflagerkonstruktion eines herkömmlichen Spiegels dienen. Eine Eigensteifigkeit der Spiegel ist nicht erforderlich),

Ersetzen von normalfestem Beton durch einen Hochleistungsbeton.

3.4 Erzeugung der Geometrie des Großdemonstrators

Die im Folgenden verwendeten Formeln sind *Müller 2013 a* entnommen.

So ist die Form der reflektierenden Oberfläche einer Parabolrinne in Querrichtung für eine Parabel mit Scheitel im Ursprung allgemein durch

$$y(x) = a \cdot x^2$$

gegeben.

Es ist

$$a = \frac{1}{4 \cdot f}$$

Dabei ist f die Fokallänge, welche als der Abstand zwischen dem Scheitelpunkt der Parabel und dem Fokalkpunkt (Mittelpunkt Absorberrohr) definiert ist. Der Fokalkpunkt $F(0,f)$ ist der Punkt, in dem die einfallende Strahlung nach ihrer Reflexion durch die Spiegeloberfläche gebündelt wird (vergl. Abb. 3.5).

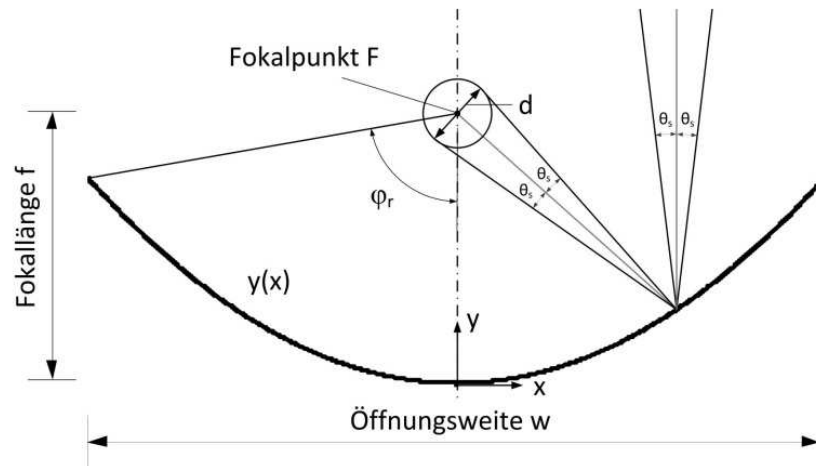


Abb. 3.5: Geometrischer Aufbau eines Parabolsegments (Quelle: Müller 2013 b)

Es kann gezeigt werden, dass die Parabelform durch eine Funktion ihres Öffnungswinkels φ_r und dem Verhältnis zwischen der Fokallänge f und der Aperturweite w beschrieben werden kann (Müller 2013 b):

$$\frac{f}{w} = \frac{1 + \cos \varphi_r}{4 \cdot \sin \varphi_r}$$

In Anlehnung an den Kollektortyp PTC 1800 wird die Aperturweite mit $w = 2,205$ m festgelegt. Für den Großdemonstrator wird in Anlehnung an das oben bereits erwähnte REACT-Projekt außerdem der Öffnungswinkel $\varphi_r = 70^\circ$ gewählt, was einen üblichen, wirtschaftlichen Öffnungswinkel für Parabolrinnen darstellt. Da ursprünglich vorgesehen war, den Großdemonstrator auf dem Testgelände des DLR in Köln-Porz aufzubauen, wurde die Geometrie des Demonstrators entsprechend gewählt, um ihn in das bestehende Solarrinnenfeld integrieren zu können. Aus Kostengründen im Rahmen des Forschungsprojekts musste dies allerdings verworfen werden.

Im hier vorliegenden Fall ist daher

$$\frac{f}{2,205 \text{ m}} = \frac{1 + \cos 70^\circ}{4 \cdot \sin 70^\circ} \Rightarrow f = 0,787 \text{ m}$$

und folglich

$$a = \frac{1}{4 \cdot 0,78727} = 0,318.$$

Somit ergibt sich für die später verspiegelte Innenseite der Parabel

$$y(x) = a \cdot x^2 = 0,318 \cdot x^2 \text{ [m]}$$

Die Rückseite folgt der Funktionsgleichung

$$y(x) = 0,326 \cdot x^2 + 0,03 \text{ [m]}$$

Dadurch hat die Betonschale an ihren freien Rändern eine Dicke von 20 mm, im Scheitel 30 mm. Die Schale ist an den Längsrändern versteift. Hierzu wurde ein 100 mm breiter Randbalken angeordnet.

Der Übergang wurde mit einem Radius $r = 39,6 \text{ mm}$ ausgeführt (vergl. Abb. 3.6).

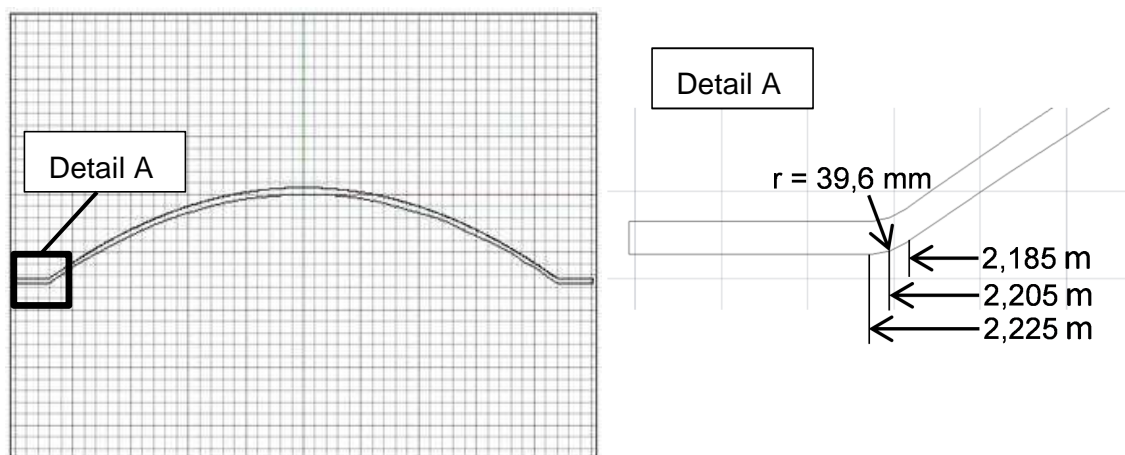


Abb. 3.6: Geometrie der Schalung

Die Länge der Parabolrinne beträgt 3,20 m. Der Grund dafür liegt in der Länge des vom DLR zur Verfügung gestellten Glashüllrohrs mit einer Länge von 3,08 m.

Betrachtet man einen einzelnen, separaten Solarstrahl, wird diesem aufgrund des Halbwinkels zur Sonne ($\theta_s = 0,267^\circ$) eine Kegelform unterstellt. Der Mindestdurchmesser d_{\min} des sich im Fokelpunkt befindlichen Absorbers kann daher nach *Duffie 2006* mit

$$d_{\min} = \frac{w \cdot \sin \theta_s}{\sin \varphi_r}$$

bestimmt werden.

Rechnerisch beträgt der Mindestdurchmesser für den hier betrachteten Großdemonstrator

$$d_{\min} = \frac{w \cdot \sin \theta_s}{\sin \varphi_r} = \frac{2,205 \cdot \sin 0,267^\circ}{\sin 70^\circ} = 0,011 \text{ m.}$$

Verwendet wurde ein Absorberrohrdurchmesser von $d = 51 \text{ mm}$. Somit sind die zuvor genannten Anforderungen an den Mindestdurchmesser erfüllt.

In Müller 2013 a und Schiel 2012 wird mittels Formanalysen gezeigt, dass sich die Fokallänge mit größer werdendem Öffnungswinkel und einer damit einhergehenden abnehmenden Parabelhöhe h verringert. Um eine übermäßige Zunahme der Fokallänge zu beschränken und um die Torsionsbeanspruchung der Parabolrinne infolge von Eigenlast zu minimieren, ist eine Ausgewogenheit zwischen Parabelhöhe und Fokallänge anzustreben. Dies wurde durch Anlehnung der Geometrie an das oben beschriebene, bestehende System PTC 1800 der Firma Solitem sichergestellt.

3.5 Erzeugung des CAD-Modells des Großdemonstrators

Im diesem Abschnitt wird das CAD-Modell dokumentiert. Dies wurde unter Verwendung der Software AutoCAD 2014 generiert. Benötigt wird das CAD-Modell sowohl für die in Kapitel 5 beschriebene Simulation des Großdemonstrators mittels ANSYS[®] als auch für dessen in Kapitel 8 dargestellte bauliche Umsetzung.

Die oben aufgestellten Funktionsgleichungen zur Beschreibung der Parabolrinne wurden mittels Microsoft Excel ausgewertet und in AutoCAD importiert (vergl. Abb. 3.7).

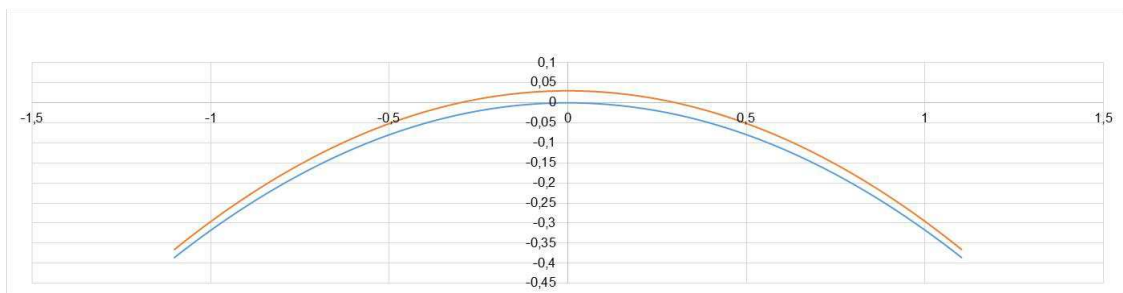


Abb. 3.7: Mittels Microsoft Excel erzeugte Parabolrinnengeometrie

In AutoCAD wurde die Geometrie durch Ergänzen der Randbalken vervollständigt.

Durch 3D-Extrusion dieses so generierten 2D-Splines wurde ein Volumenkörper erzeugt.

Die so erzeugten Geometriedaten können sowohl für die in Kapitel 7 beschriebenen Finite-Elemente-Analysen als auch für die in Kapitel 8 dokumentierte bauliche Umsetzung des Großdemonstrators verwendet werden.

4 Betonwahl und durchgeführtes Untersuchungsprogramm - Nanodur[®]-Beton

Dieses Kapitel hat die Werkstofffindung und -untersuchung zum Inhalt. Ziel ist es, einen geeigneten Beton zu finden, der die Anforderungen, die im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojekts bestehen, erfüllt. Aus diesem Grund sind die Definition von Eignungskriterien sowie die Entwicklung und Durchführung von Prüfverfahren zur Überprüfung dieser Kriterien ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Betonzusammensetzung, des Mischregimes sowie alle damit durchgeführten Frisch- und Festbetonuntersuchungen beschrieben.

4.1 Anforderungen an einen Beton für Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke

Wesentliche Kriterien für den hier betrachteten Anwendungsfall von Beton sind:

- 1) Verformungsarmut und Formbeständigkeit zur Erzielung eines hohen Systemwirkungsgrads,
- 2) eine hohe Biegezugfestigkeit bei Berücksichtigung von Ermüdung und Eigenspannungen sowie Rissefreiheit im Gebrauchszustand, um eine steife, verformungsarme Tragstruktur zu erzielen,
- 3) geeignete rheologische Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitbarkeit,
- 4) eine geringe Erhärtungszeit zur Reduzierung der Schalfristen,
- 5) schwindarmes Verhalten, um ein Aufschüsseln der Parabolrinne zu vermeiden sowie die resultierenden Zwängungen gering zu halten,
- 6) kostengünstige Herstellung,
- 7) hohe Wertschöpfung am Kraftwerksstandort.

Es bestehen zahlreiche Analogien zur neuartigen Verwendung von Beton im Maschinenbau (*Sagmeister 2012 a*). Beton verfügt im Allgemeinen über eine verhältnismäßig geringe Zugfestigkeit, weshalb in der Regel Bewehrung oder Fasern eingesetzt werden. Auftretende Risse werden so überbrückt und Zugkräfte in Verbundquerschnitten stark verminderter Steifigkeiten übernommen. Rissbreiten und -abstände können so gesteuert werden. Ein Auftreten des Risses selbst wird jedoch nicht verhindert. Für einen wirtschaftlichen Betonkollektor wird aber eine Schale mit einer definierten Steifigkeit und Verformung benötigt, also mit einem näherungsweise homogenen und ungerissenen Querschnitt. Erforderlich wird daher eine hohe Biegezugtragfähigkeit des ungerissenen Werkstoffs, sodass das Bauteil ausschließlich linear-elastisch berechnet werden kann. Ermüdungen und Eigenspannungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Damit ein hoher Interceptfaktor und damit direkt verbunden ein hoher Gesamtwirkungsgrad der Kollektoren erzielt werden kann, ist eine große Genauigkeit und Formstabilität derselben von zentraler Bedeutung. Neben Anforderungen an den Schalungsbau und an die Auflagerkonstruktion bestehen so auch Anforderungen an den Beton selbst bezüglich seines Schwind- und Kriechverhaltens. Dieses muss

bekannt und quantifizierbar sein, um es bereits bei der Herstellung der Betonteile berücksichtigen zu können.

Um hinsichtlich der Bauzeit eines Parabolrinnenkraftwerkes mit derzeitigen Systemen konkurrieren zu können und um die Wirtschaftlichkeit der Produktionsanlage durch geringe Schalfristen zu gewährleisten, ist die Beschleunigung der Festigkeitsentwicklung des verwendeten Betons unabdingbar. Hierzu gibt es nach *Dittmar 2013 a* verschiedene Möglichkeiten: Auf betontechnologischer Seite sind dies die Verwendung eines Zements mit schneller Frühfestigkeitsentwicklung, ein niedriger Wasser-Zement-Wert sowie das Einstellen der gewünschten Verarbeitbarkeit mittels eines ausgewählten Hochleistungs-Fließmittels. Die Wärmebehandlung ist die unter den verfahrenstechnischen Maßnahmen am weitesten verbreitete und wird im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls verfolgt.

Geeignete Standorte für Parabolrinnenkraftwerke sind in der Regel Wüstengebiete. Dort herrschen häufig korrosive Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise salzhaltige Böden. Der Widerstand gegen aggressive Medien ist daher ein weiterer Gesichtspunkt bei der Wahl des geeigneten Werkstoffs.

Zentrales Kriterium für die Realisierbarkeit eines aus Betonkollektoren bestehenden solarthermischen Kraftwerks sind die Kosten. Somit sind auch die reinen Materialkosten des Betons von entscheidender Bedeutung.

Ein weiterer Aspekt ist die Herstellbarkeit der Betonkollektoren: Länder, in denen bereits solche Kraftwerke existieren, derzeit gebaut werden oder zumindest konkrete Pläne dazu vorliegen, liegen aufgrund ihrer geeigneten geographischen Voraussetzungen überwiegend in Nordafrika oder im Nahen Osten (*Peitsmeier 2013*), also Ländern mit Entwicklungsbedarf hinsichtlich ihrer Betonindustrie. Nach *Deuse 2009* existiert mit dem von der Dyckerhoff AG entwickelten und produzierten UHPC-Compound Nanodur[®] eine Lösung, um hochfesten Beton auch in konventionellen Fertigteilwerken oder sogar in Transportbetonwerken unter Verwendung konventioneller Mischanlagen und üblicher Gesteinskörnung zuverlässig herstellen zu können. Dies ist erforderlich, da die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke nur durch optimierte Herstellungs- und Transportprozesse gewährleistet werden kann.

Aufgrund zahlreicher unter Verwendung von Nanodur[®]-Beton erfolgreich realisierter Referenzprojekte schien eine Untersuchung der Eignung desselben für den im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Anwendungsfall Erfolg versprechend, und wird im Folgenden näher erläutert.

4.2 Beispiele aus der Praxis für die Anwendung von Nanodur[®]-Beton

In *Opus C 2011* werden als Anwendungsbeispiele acht aus Nanodur[®]-Beton hergestellte Garderobenstelen für den neu gestalteten Eingangsbereich des Bibelhauses ErlebnisMuseum in Frankfurt am Main aufgeführt. Diese konnten in schlanker, filigraner Bauweise realisiert werden: Bei einer Elementhöhe von 2,90 m und einer Breite von 1,05 m beträgt die Plattendicke dennoch nur 5 cm ohne die Zugabe von Fasern und Bewehrung. Die Anforderungen an die Qualität und Optik der Oberflächen des allseitigen Sichtbetons waren hoch: Es mussten eine durchgehende einheitliche Farbgebung, Porenfreiheit und Sichtbetonqualität auf beiden Seiten erfüllt werden (vergl. Abb. 4.1).



Abb. 4.1: Garderobenstelen im neueröffneten Bibelhaus (Quelle: *Opus C 2011*)

Bei dem Anwendungsfall Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke stehen einheitliche Farbgebung und Sichtbetonqualität aus ästhetischen Ansprüchen nicht im Vordergrund. Wird die Reflektivität der Kollektoroberfläche jedoch mittels der Applikation einer Folie oder einer Beschichtung realisiert ist die Porenfreiheit der zu verspiegelnden Oberfläche von großer Relevanz, um einen hohen Reflexions- und damit einen hohen Gesamtwirkungsgrad des Systems zu erzielen. Durch die guten Selbstverdichtungseigenschaften des Nanodur[®]-Betons und der dichten Packung im Grob- und Feinbereich bis herunter auf die Nanoebene (*Durcrete 2011 b*) können solche porenfreie Oberflächen realisiert werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld von Nanodur[®]-Beton sind in beispielsweise *Durcrete 2011 a*, *Durcrete 2011 b*, *Sagmeister 2012 a*, *Sagmeister 2012 b* und *Sagmeister 2012 c* beschriebene Maschinenbetten (vergl. Abb. 4.2) und Werkzeuggestelle für Fräs-, Dreh- und Schleifmaschinen. Diese Verwendung von Beton im Maschinenbau stellt ein verhältnismäßig junges Anwendungsfeld dar. Massive Maschinenbetten und Werkzeuggestelle werden hier benötigt, um schnellere Präzisionsbearbeitung in Verbindung mit kürzeren Taktzeiten und geringerem Werkzeugverschleiß erreichen zu können. Bislang dominierten hier Mineralguss und Naturstein aufgrund ihrer hohen Masse. Die Materialauswahl konnte jedoch in den letzten Jahren um den Werkstoff Hochleistungsbeton erweitert werden. Auch bei diesem Anwendungsfall werden ähnliche Anforderungen an den verwendeten Werkstoff wie bei Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke gestellt, die von Nanodur[®]-Beton erfüllt werden:

Das Material verfügt über eine hohe Biegezugfestigkeit.

Es existiert ein spezielles Verfahren der Wärmebehandlung, um das Material standfest zu machen, welches vom Wilhelm-Dyckerhoff-Institut der Dyckerhoff AG entwickelt wurde. Dabei wird das Bauteil im Herstellwerk auf 90 °C erhitzt und lagert mindestens 24 Stunden bei dieser Temperatur oder es wird durch Autoklavieren nachbehandelt. Hierdurch ist es möglich, Verformungen infolge der Abbindeprozesse im Beton auszuschließen. Dies stellt Rissfreiheit und eine definierte Steifigkeit des Bauteils sicher.



Abb. 4.2: Maschinenbetten aus Hochleistungsbeton (Quelle: *Durcrete 2011 b*)

Aufgrund seiner Eigenschaften, Referenzen und erfolgreichen Anwendungen wurde Nanodur[®]-Beton als geeignet befunden, im Rahmen dieser Arbeit verwendet zu werden. Die Entwicklung einer passenden Nanodur[®]-basierten Betonrezeptur für den hier vorliegenden Anwendungsfall von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke sowie umfassende Untersuchungen an dieser schienen Erfolg versprechend und werden im Folgenden beschrieben.

4.3 Besonderheiten von Nanodur[®]-Beton

Üblicherweise wird bei hochfestem Beton eine hohe Packungsdichte durch die Verwendung industrieller Nebenprodukte wie beispielsweise Silikastaub erreicht. Die Erhöhung der Packungsdichte wird beim Nanodur[®]-Beton auf andere Weise gelöst: Nachdem die Zementkomponenten vermahlen sind, werden sie gesichtet und klassifiziert. Während dieses Prozesses gewonnene Feinstanteile werden anschließend mit Basis-Normzementen und mineralischen Feinststoffen in einer genau festgelegten Sieblinie neu zusammengesetzt. Nanostrukturierte synthetische Kieselsäuren werden zur Hydratationssteuerung eingesetzt. Die Klebrigkeit und Zähigkeit von Nanodur[®]-Beton sind deutlich geringer als die von klassischem UHPC, der unter Verwendung von Silikastäuben hergestellt wird. Aus diesem Grund sind keine Spezialmischer notwendig. In Fertigteilwerken vorhandene konventionelle Mischanlagen sind ausreichend. Regional verfügbare Gesteinskörnungen können verwendet werden, da diese die Betoneigenschaften nur wenig beeinflussen (*Sagmeister 2012 a*).

4.4 Betonausgangsstoffe, -rezepturen, -herstellung, Wärmebehandlung

Nach *Durcrete 2011 b* handelt es sich bei Nanodur[®]-Beton um eine homogene, kalt erhärtende Gussmasse. Sie besteht aus naturfeuchtem Split, Sand, Gesteinsmehlen und einem rein mineralischen Spezialzement, der als Bindemittel dient. Wasser wird als chemischer Reaktionspartner oder Härter in geringem Maße benötigt. Auch nach der Zugabe des Wassers liegt noch ein rieselfähiges Gemisch vor, sodass die Verflüssigung, Selbstverdichtung und die selbstentlüftende Eigenschaft des Betons durch ein chemisches Fließmittel erzeugt werden müssen. Die Zähigkeit der Mischung kann eingestellt werden und reicht von hefeteigartiger bis flüssiger Konsistenz.

Die Entwicklung der Mischungen sowie die Durchführung des im Folgenden dargestellten Untersuchungsprogramms erfolgten in Absprache mit der Dyckerhoff AG und der durcrete GmbH und in Anlehnung an *Dyckerhoff 2012*.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Betonrezepturen M1, M2 und M3 entwickelt und einander gegenübergestellt. Der Unterschied zwischen den Mischungen liegt in der Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers bei M2 und M3.

4.4.1 Ausgangsstoffe

4.4.1.1 Bindemittel

Für beide Betone wurde als Bindemittelkomponente die UHPC-Compound „Nanodur[®] Compound 5941 weiß“ verwendet, die von der Dyckerhoff AG entwickelt wurde und produziert wird.

„Nanodur[®] Compound 5941 weiß“ ist nach *Dyckerhoff 2011 a* und *Dyckerhoff 2013* eine Bindemittelvormischung auf Basis eines Zements CEM II/B-S 52,5 R. Dieser wird mit Quarzmehl im Verhältnis 59:41 gemischt. Hiermit ist die Herstellung von Hochleistungsbeton oder hochfestem Beton in konventionellen Betonmischanlagen möglich. Durch Vormischen aller Feinstanteile kleiner als 0,25 mm unabhängig vom Nassmischprozess vorab im Zementwerk wird die angestrebte dichte Packung gewährleistet. In Tab. 4.1 sind die Bindemitteldaten von „Nanodur[®] Compound 5941 weiß“ aufgeführt.

Tab. 4.1: Bindemitteldaten mit Normsand bei w/z-Wert 0,5 nach *DIN EN 196-1* (nach *Dyckerhoff 2013*)

Nanodur [®] Compound 5941 weiß		
Wasseranspruch	[%]	26
Erstarrungsbeginn	[min]	180
Druckfestigkeit nach 2 d	[N/mm ²]	12
Druckfestigkeit nach 28 d	[N/mm ²]	35

4.4.1.2 Gesteinskörnung

Es wurden eine feine Gesteinskörnung Rheinsand (0/2) sowie eine grobe Gesteinskörnung Basaltsplitt (1/3) verwendet. Die Korngrößenverteilung wurde nach *DIN EN 933-1* ermittelt und ist in Tab. 4.2 dargestellt.

Tab. 4.2: Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen

Gesteinskörnung	Korngrößenverteilung (Siebdurchgang in M.-%)									
	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	2,8	4	5,6
Rheinsand 0/2	0	0	2	26	90	97	99	100	100	
Basaltsplitt 1/3	0	0	1	1	1	4	53	95	100	100

Die Rohdichten wurden nach *DIN EN 1097-6* und *DIN EN 1097-7* ermittelt, die des Rheinsands 0/2 beträgt 2,61 kg/dm³, die des Basaltsplitts 1/3 3,05 kg/dm³.

4.4.1.3 Zusatzmittel

Als Fließmittel wurde das Produkt „Glenium ACE 430 (FM)“ der Firma BASF verwendet (*BASF 2013 c*). In Tab. 4.3 sind relevante Kenndaten aufgeführt.

Tab. 4.3: Technische Daten des verwendeten Fließmittels (nach *BASF 2013 c*)

Technische Daten		Glenium ACE 430 (FM)
Rohstoffbasis	-	Polycarboxylatether
Dichte	g/cm ³	1,06
Feststoffgehalt	%	30
Empfohlener Dosierbereich	M.-% vom Zementgewicht	0,2 – 3,0

Das Produkt „Eclipse[®] Floor“ (*Grace 2012*) wurde als Schwindreduzierer eingesetzt. In Tab. 4.4 sind relevante Kenndaten aufgeführt.

Tab. 4.4: Technische Daten des verwendeten Schwindreduzierers (nach *Grace 2012*)

Technische Daten		Eclipse [®] Floor
Wirkstoff	-	Glykoether
Dichte	g/cm ³	0,97
Wirkstoffgehalt	%	100
Empfohlener Dosierbereich	l / m ³	2,5 – 7,5

Als Erhärtungsbeschleuniger wurde das Produkt „X-SEED[®] 100“ (*BASF 2013 a* und *BASF 2013 b*) gewählt. Dieser dient der Erhöhung der Frühfestigkeitsentwicklung

von Beton im Bereich von 6 bis 12 Stunden. Er basiert auf der Seeding-Technologie. Das Funktionsprinzip besteht darin, das Wachstum der Calcium-Silikat-Hydrat-Kristalle zu beschleunigen. Dies ist essentiell für die Frühfestigkeitsentwicklung. Laut Herstellerangaben funktioniert dies in allen Temperaturbereichen sowie unter Dampferhärtung. Dies ist insofern relevant, als bei der Herstellung von Parabolrinnen aus Beton die Schalfrist von entscheidender Bedeutung ist, wobei Wärmebehandlung oder Autoklavierung des Betons zuträglich sein kann. Bei der Produktwahl ist auf die Kompatibilität mit dem Fließmittel zu achten, da es bei Unverträglichkeit der beiden zum sogenannten Slump-Kill kommt. Die Kompatibilität von X-SEED® 100 und Glenium ACE 430 (FM) wurde vorab vom Hersteller bescheinigt.

In Tab. 4.5 sind relevante Kenndaten von X-SEED® 100 aufgeführt.

Tab. 4.5: Technische Daten des verwendeten Erhärtungsbeschleunigers (nach *BASF 2013 a* und *BASF 2013 b*)

Technische Daten		X-SEED® 100
Rohstoffbasis	-	Synthetisch produzierte Kristallkeime
Dichte	g/cm ³	1,135
Feststoffgehalt (Annahme)	%	21,5
Empfohlener Dosierbereich	M.-% vom Zementgewicht	2,0 – 4,0

Auf Empfehlung der BASF Performance Products GmbH wird die Gesamtmenge in Kilogramm an zugegebenem X-SEED® 100 beim Zugabewasser abgezogen.

Weiterführendes hierzu findet sich in *Dittmar 2013 a*, *Dittmar 2013 b* und *Ludwig 2011*.

4.4.2 Mischungsberechnungen

Die in Tab. 4.6 dargestellten Rezepturen M1, M2 und M3 wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und für alle Versuche sowie für den Bau des Großdemonstrators verwendet.

M1 ist die Standardrezeptur und wurde auch bei dem Bau des Großdemonstrators (vergleiche Kapitel 8) eingesetzt. Bei M2 und M3 kam ein Erhärtungsbeschleuniger zum Einsatz. Bei M2 war dies eine Menge von 2,0 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt, bei M3 4,0 Masse-%.

Dabei wurden der Wassergehalt sowie die Fließmittelmenge im Rahmen von Vorversuchen mit M1 ermittelt, sodass die gewünschte Konsistenz erzielt werden konnte. Die Zielkonsistenz war ein Setzfließmaß von etwa 840 mm \pm 20 mm nach 60 s Fließzeit bei Verwendung der Kegelform nach *DIN EN 12350-2*. Grund hierfür ist, dass der Beton bei dieser Konsistenz gut verarbeitbar war und gut in die Schalung von Betonteilen mit teilweise sehr geringen Dicken (10 mm) eingebracht werden konnte, was für die in Kapitel 5 durchgeführten Versuche zum Schwindverhalten von Nanodur®-Beton erforderlich war. Bei dieser Konsistenz wies der Beton auch ein

gutes Entlüftungsverhalten bei ausreichender Stabilität gegen Entmischen auf, was ebenfalls ein wichtiger Gesichtspunkt war.

Tab. 4.6: Betonrezepturen Nanodur®-Beton M1, M2 und M3

Ausgangsstoff	Rohdichte [kg/m³]	Zusammensetzung [kg/m³]		
		M1	M2	M3
Nanodur® Compound 5941 weiß	2,86	1042,0	1042,0	1042,0
Rheinsand 0/2	2,61	426,0	426,0	426,0
Basaltsplitt 1/3	3,05	882,0	882,0	882,0
Zugabewasser (ohne Berücksichtigung Fließmittel)	1,00	160,0	147,7	135,4
Fließmittel Glenium ACE 430 3,3 M.-% vom Bindemittelgehalt	1,06	20,3	20,3	20,3
Schwindreduzierer Eclipse® Floor	0,97	8,0	8,0	8,0
Erhärtungsbeschleuniger X-SEED® 100	1,135	-	12,3	24,6

Hinweis: Der in *BASF 2013 c* für das Fließmittel empfohlene Dosierbereich wurde geringfügig überschritten, um die gewünschte Betonkonsistenz zu erhalten. Auch die verwendete Schwindreduzierermenge übersteigt die Empfehlung in (*Grace 2012*) in geringem Maße. Beides erfolgte jedoch in Absprache mit der Dyckerhoff AG und den genannten Firmen, da die Werte sich auf Standardbetone mit deutlich geringeren Zementgehalten beziehen.

Der Wasserzementwert w/z von M1 wird bezogen auf 59 % Zementgehalt des „Nanodur® Compound 5941 weiß“ unter Berücksichtigung eines Wassergehalts von 70 % im Fließmittel ermittelt:

$$\frac{w}{z} = \frac{160,0 \text{ kg} + 14,2 \text{ kg}}{614,8 \text{ kg}} = 0,28$$

Da die Gesamtmenge in Kilogramm an zugegebenem „X-SEED® 100“ beim Zugabewasser abgezogen wird verändert sich der Wasserzementwert bei Verwendung des Erhärtungsbeschleunigers nicht. M2 und M3 weisen daher ebenfalls einen Wasserzementwert $w/z = 0,28$ auf.

4.4.3 Betonherstellung

Zum Anmischen des Nanodur[®]-Betons wurde stets ein ELBA Labor-Zwangsmischer EMS 60 C (ELBA 2011 und ELBA 2014) verwendet (vergl. Abb. 4.3).



Abb. 4.3: ELBA Labor-Zwangsmischer EMS 60 C

Die Betonherstellung erfolgte nach folgendem in Tab. 4.7 dargestellten Mischregime, um ein Verklumpen der Ausgangsstoffe zu vermeiden:

Tab. 4.7: Mischregime

von [min]	bis [min]	Vorgang	Um- drehungen des Mi- schers [1/min]
00:00	01:00	Gesteinskörnungen und Bindemittel trocken vor- mischen	30
01:00	03:00	Zugabe des Zugabewassers bei laufendem Mi- scher	30
03:00	03:30	Zugabe des Fließmittels, des Schwindreduzierers und gegebenenfalls des Erhärtungsbeschleuni- gers bei laufendem Mischer	30
03:30	08:00	Mischen	45
08:00	10:00	Mischen mit erhöhter Mischerumdrehungsge- schwindigkeit	60
10:00	11:00	Mischen mit verringerter Mischerumdrehungsge- schwindigkeit	20

4.5 Durchgeführte Frischbeton- und Festbetonuntersuchungen

Im Rahmen dieser Arbeit war es erforderlich, den verwendeten Nanodur[®]-Beton sowohl hinsichtlich seiner Festbeton- als auch seiner Frischbetoneigenschaften ausführlich zu untersuchen. Die Versuche sowie deren Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Die im Folgenden erläuterten Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften dienen ausschließlich dem Vergleich der drei Mischungen M1, M2 und M3 miteinander. Eine Diskussion und Wertung der Versuchsergebnisse ist in Kapitel 4.5.1.7 zu finden.

4.5.1 Frischbetoneigenschaften

Der Konsistenz und der Verarbeitbarkeit des verwendeten Betons werden im Rahmen dieser Arbeit große Bedeutung zugemessen.

Zur Beurteilung der Frischbetoneigenschaften der drei verwendeten Mischungen M1, M2 und M3 und um diese vergleichen zu können wurde daher ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt. Es umfasste die Bestimmung

der Frischbetontemperatur,
des Setzfließmaßes mit und ohne Blockierring,
der t_{500} -Zeit mit und ohne Blockierring,
der Trichterauslaufzeit,
der Frischbetonrohddichte,
des Luftgehaltes

von M1, M2 und M3.

Dieses Versuchsprogramm war daher etwas umfangreicher als es in *DAfStb 2008* und *DAfStb 2012* für die Anwendung von ultrahochfesten selbstverdichtenden Betonen vorgeschlagen wird. All diese Frischbetoneigenschaften wurden an zwei verschiedenen Messzeitpunkten nach dem Mischende gemessen. Alle Zeitangaben beziehen sich auf das Mischende als Nullpunkt. Die bei den verschiedenen Kenngrößen unterschiedlichen Messzeitpunkte ergaben sich aus versuchstechnischen Randbedingungen im Labor.

Über die betrachtete Dauer wurde der Nanodur[®]-Beton im Mischer gelagert, welcher mit einer Folie abgedeckt war. Unmittelbar vor dem Durchführen der Prüfungen wurde der Beton nochmals kurz durchgemischt.

Alle Betonausgangsstoffe wurden vor dem Mischbeginn für mindestens 24 Stunden bei 8 °C gelagert.

4.5.1.1 Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur wurde zu den beiden Zeitpunkten eine Minute und 45 Minuten nach dem Mischende gemessen (vergl. Tab. 4.8).

Tab. 4.8: Frischbetontemperatur von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Frischbetontemperatur [°C]		Umgebungslufttemperatur [°C]	
	1	45	1	45
M1	21,4	22,4	22,6	23,4
M2	24,3	22,2	22,9	23,0
M3	20,7	21,9	23,2	23,0

4.5.1.2 Setzfließmaß und t_{500} -Zeit

Die in *DIN EN 12350-2* beschriebene Ermittlung des Setzmaßes gilt ausschließlich für steife Betone. Der dort beschriebene Setzversuch eignet sich ausschließlich für Betone mit einem Setzmaß zwischen 10 und 210 mm. Er ist daher ungeeignet für den an dieser Stelle zu untersuchenden Nanodur[®]-Beton.

Auch die Anwendung von *DIN EN 12350-5* war an dieser Stelle nicht möglich. Der Grund hierfür ist, dass die Ermittlung des Ausbreitmaßes gemäß dieser Norm nur für Änderungen der Konsistenz von Betonen gültig ist, die einem Ausbreitmaß von bis zu 600 mm entsprechen.

Da der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nanodur[®]-Beton dieses übersteigt und als selbstverdichtender Beton einzustufen ist, wurde stattdessen gemäß *DIN EN 12350-8* das dort beschriebene Verfahren zur Bestimmung des Setzfließmaßes sowie der t_{500} -Zeit für selbstverdichtenden Beton angewendet. Dieses Verfahren gründet auf dem Setzmaß-Versuch nach *DIN EN 12350-2*. Nach *DIN EN 12350-8* ist die Angabe der Füllfähigkeit des untersuchten selbstverdichtenden Betons das Ergebnis dieses Verfahrens. Durch die ermittelte Zeit t_{500} können die Ausbreitgeschwindigkeit, und außerdem die relative Viskosität beurteilt werden.

Nach *DIN EN 12350-8* wurde zur Bestimmung des Setzfließmaßes sowie der t_{500} -Zeit eine Kegelform nach *DIN EN 12350-2* verwendet. In diese wurde der Beton geschüttet. Anschließend wurde die Form nach oben gehoben. Die Zeit t_{500} ist die Zeit, die der Beton benötigt um einen Ausbreitdurchmesser von 500 mm zu erreichen, gemessen ab dem Beginn des Anhebens der Kegelform. Das Setzfließmaß ist der Mittelwert aus dem größten Ausbreitdurchmesser und dem Ausbreitdurchmesser, der rechtwinklig zu diesem vorliegt (vergl. Abb. 4.4).



Abb. 4.4: Bestimmung des Setzfließmaßes SF sowie der t_{500} -Zeit gemäß *DIN EN 12350-8*

Tab. 4.9: Setzfließmaß SF von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Setzfließmaß SF [mm]	
	25	65
M1	850	830
M2	850	880
M3	840	800

Tab. 4.10: t_{500} -Zeit von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	t_{500} [s]	
	25	65
M1	18	18
M2	18	17
M3	30	27

4.5.1.3 Blockierring-Versuch und t_{500J} -Zeit

Dieser Versuch wurde gemäß *DIN EN 12350-12* durchgeführt und dient der Bewertung des Fließvermögens von selbstverdichtendem Beton, wenn dieser durch enge Öffnungen fließt. So darf er beispielsweise auch beim Fließen durch die Zwischenräume zwischen Bewehrungsstäben oder zwischen anderen Hindernissen weder entmischen noch verstopfen (vergl. Abb. 4.5).

Alternativ kann der L-Kastenversuch nach *DIN EN 12350-10* eingesetzt werden.



Abb. 4.5: Bestimmung des Ausbreitmaßes SF_J , der Fließzeit t_{500J} sowie der Blockierneigung PJ von M1, M2 und M3 gemäß *DIN EN 12350-8*

Tab. 4.11: Ausbreitmaß SF_J von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Ausbreitmaß SF_J [mm]	
	5	50
M1	880	880
M2	830	830
M3	820	820

Tab. 4.12: Fließzeit t_{500J} von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Fließzeit t_{500J} [s]	
	5	50
M1	21	20
M2	26	23
M3	50	38

Tab. 4.13: Blockierneigung PJ von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Blockierneigung PJ [mm]	
	5	50
M1	3	4
M2	4	3
M3	5	4

4.5.1.4 Frischbetonrohddichte

Die Ermittlung der Frischbetonrohddichte erfolgte gemäß *DIN EN 12350-6*.

Tab. 4.14: Frischbetonrohddichte von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]	
	20	70
M1	2490	2494
M2	2464	2460
M3	2443	2462

4.5.1.5 Luftgehalt

Der Luftgehalt von M1, M2 und M3 wurde gemäß *DIN EN 12350-7* mittels eines Behälters mit einem Fassungsvermögen von 8 Litern ermittelt (vergl. Abb. 4.6).



Abb. 4.6: Bestimmung des Luftgehaltes gemäß *DIN EN 12350-7*

Tab. 4.15: Luftgehalt von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Luftgehalt [Vol.-%]	
	20	70
M1	1,1	1,2
M2	1,4	1,3
M3	2,6	2,6

4.5.1.6 Auslauftrichter-Versuch

Dieser Versuch wurde nach *DIN EN 12350-9* durchgeführt. Er dient der Bewertung der Viskosität und der Füllfähigkeit von selbstverdichtendem Beton (vergl. Abb. 4.7).

Abb. 4.7: Auslauftrichterversuch gemäß *DIN EN 12350-9*Tab. 4.16: Auslauftrichter-Fließdauer t_v von M1, M2 und M3

Betonalter [min]	Auslauftrichter-Fließdauer t_v [s]	
	5	50
M1	38,0	39,0
M2	50,0	41,0
M3	103,0	68,0

4.5.1.7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zum Frischbetonverhalten von Nanodur[®]-Beton können wie folgt zusammengefasst werden.

Anhand des sehr großen Setzfließmaßes wird deutlich, dass der hier verwendete Nanodur[®]-Beton auch bei einer Verarbeitung von über 65 Minuten nach Mischende sehr fließfähig ist. Er benötigt nur ausreichend Zeit, um dieses Maß zu erreichen. Sein Fließverhalten wird auch durch Hindernisse wie Bewehrungsstäbe nicht beeinträchtigt. So ist seine Verarbeitung trotz langer Trichterauslaufzeit, die außerhalb von *DIN EN 206-9* (Tabelle 3) liegt, gewährleistet. Der praktische Anwendungsfall des Großdemonstrators (vergl. Kapitel 8) hat gezeigt, dass die Verarbeitbarkeit von Nanodur[®]-Beton durchaus gegeben ist. Es ist jedoch erforderlich, die Nanodur[®]-basierte Mischung stets für die Anforderungen des jeweiligen Bauteils über die Art und das Mischungsverhältnis der Betonausgangsstoffe individuell einzustellen.

Folgende Versuche nach Norm wurden durchgeführt, um die drei Mischungen M1, M2 und M3 auf dieser Grundlage miteinander vergleichen zu können:

Frischbetontemperatur,

Setzfließmaß und t_{500} -Zeit (*DIN EN 12350-8*),

Blockierringversuch und t_{500J} -Zeit (*DIN EN 12350-12*),

Frischbetonrohddichte (*DIN EN 12350-6*),

Luftgehalt (*DIN EN 12350-7*),

Auslauftrichterversuch (*DIN EN 12350-9*).

Die Verarbeitbarkeit von Nanodur[®]-Beton kann auf dieser Basis jedoch aufgrund seiner hefeteigartigen Konsistenz nicht sachgerecht beurteilt werden.

4.5.2 Festbetonrohichte

Die Festbetonrohichte wurde in Anlehnung an *DIN 1048-5* und *DIN EN 12390-7* an sechs Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm, acht Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm und drei Prismen der Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm bestimmt (vergl. Tab. 4.17).

Tab. 4.17: Festbetonrohichte von M1 gemäß *DIN 1048-5*

	Festbetonrohichte [kg/m ³]	
	Einzelwerte	Mittelwert
Würfel	2501	2524
Zylinder	2536	
Prismen	2536	

4.5.3 Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme

Bei hochfestem Beton kann – wie auch in *Alonso 2002 a* und *Alonso 2002 b* zusammengefasst – aufgrund seines niedrigen Wasserzementwerts eine annähernd vollständige Hydratation nicht realisiert werden. Die Wärmeenthalpie des Zements wird deshalb nicht in vollem Umfang freigesetzt. Aufgrund seines hohen Zementgehalts ist in den ersten Tagen im Vergleich zu normalfestem Beton dennoch eine erhöhte Wärmeentwicklung infolge Hydratation festzustellen. Mit dieser steigt das Risiko einer frühen Rissbildung, falls die Verkürzungen des entsprechenden Bauteils während des Prozesses des Abfließens der Hydratationswärme teilweise oder ganz behindert sind. Außerdem ist eine schnellere Verformungszunahme in der Phase des Abkühlens infolge von autogenem Schwinden möglich (*Bergner 1997* und *Sule 2001*).

Nach *Faust 2003* wird in *Norwegian Concrete 1999* empfohlen, bei der Betonherstellung eine maximale Temperatur infolge Hydratationswärme von 65 °C nicht zu überschreiten.

Um die Einhaltung dieses Grenzwerts zu überprüfen und um das Temperaturverhalten infolge Hydratationswärme des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Nanodur[®]-Betons beurteilen zu können, wurde seine Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme an der Technischen Universität Kaiserslautern messtechnisch erfasst.

Außerdem wurde der Einfluss des Erhärtungsbeschleunigergehaltes auf die Hydratationswärmeentwicklung untersucht.

Insgesamt wurden in diesem Kapitel daher drei Versuchsreihen durchgeführt, um die Temperaturgänge während der Hydratation von M1, M2 und M3 einander gegenüberstellen zu können.

Bei jeder der drei Versuchsreihen wurde Frischbeton in drei Thermobehälter, welche adiabatische Bedingungen sicherstellen, mit einem Fassungsvermögen von je 2,0 kg eingefüllt (vergl. Abb. 4.8). In allen drei Behältern befand sich jeweils ein Thermo- draht im Volumenmittelpunkt des Betons. Mittels eines Datenloggers wurde so der Temperaturgang des hydratisierenden Betons erfasst. Die Messung begann unmittelbar nach dem Beenden des Mischvorgangs und wurde über eine Messdauer von 75 Stunden durchgeführt. Der Versuch fand in einer Klimakammer des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern statt, in der die Raumtemperatur konstant auf 20° C und die relative Luftfeuchte auf 65 % gehalten wurden.

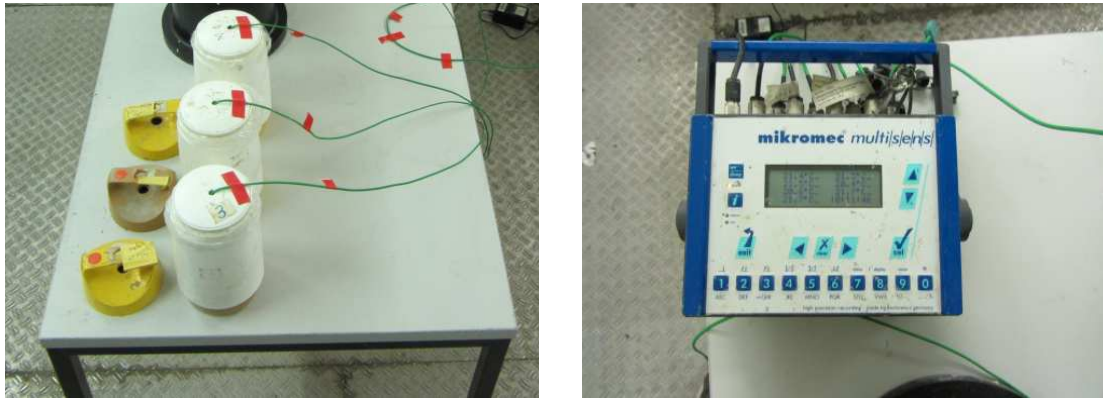


Abb. 4.8: Versuchsaufbau Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme unter adiabatischen Bedingungen, links: Thermobehälter, rechts: Datenlogger zum Aufzeichnen der Temperaturentwicklung

In der folgenden Abb. 4.9 werden die Mittelwerte der Temperaturverläufe der drei unterschiedlichen Mischungen M1, M2 und M3 gezeigt.

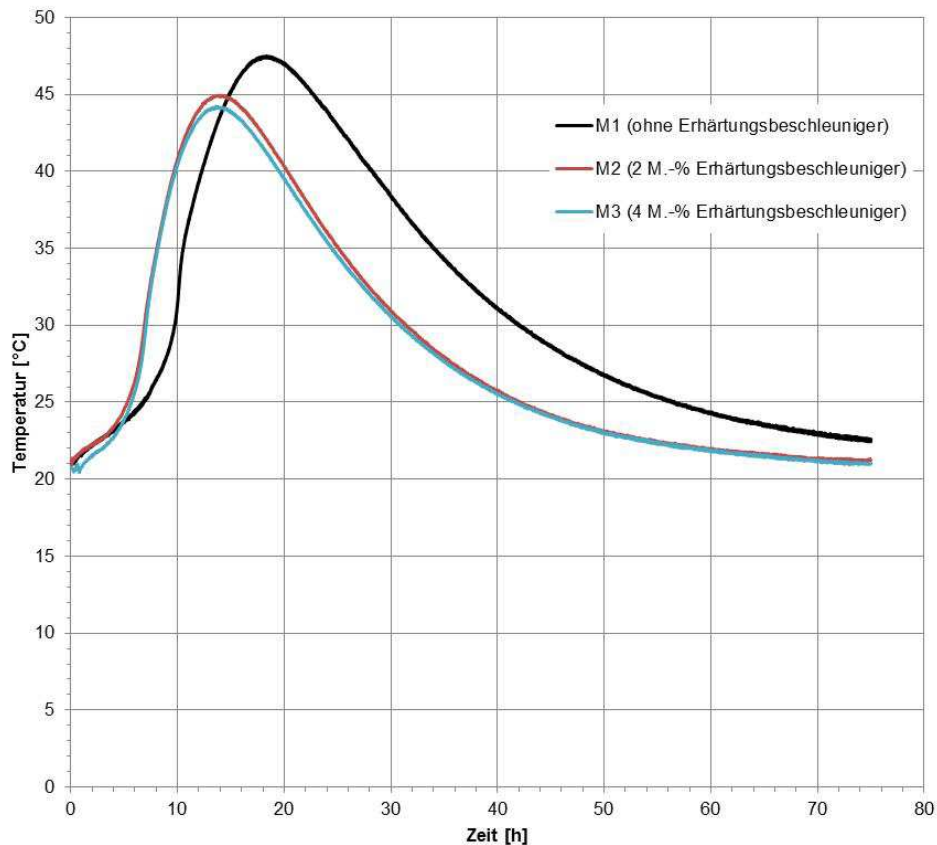


Abb. 4.9: Temperaturverläufe infolge Hydratationswärme von M1, M2 und M3 unter adiabatischen Bedingungen

Das Temperaturmaximum betrug 47,5 °C bei M1 (18,2 h nach Mischende), 44,9 °C bei M2 (13,4 h nach Mischende) und 44,2 °C (13,6 h nach Mischende) bei M3.

Bei M1 wurde im Zeitraum zwischen dem Temperaturmaximum und einem Alter des Betons von 48 Stunden eine mittlere Abkühlgeschwindigkeit von 0,67 K/h gemessen, bei M2 betrug diese 0,62 K/h und 0,60 K/h bei M3, ebenfalls jeweils auf den Zeitraum zwischen Temperaturmaximum und einem Betonalter von 48 Stunden bezogen.

Diese gemessenen Abkühlgeschwindigkeiten entsprechen den in *DAfStb 2008* mit 0,5 bis 1,5 K/h angegebenen.

Die Bedingungen für den Beton unter adiabatischen Bedingungen im Thermobehälter entsprachen dabei denen in einem massigen Bauteil.

Die Maximaltemperatur aus allen drei Versuchsreihen trat mit einem Wert von 47,5 °C bei M1 auf. Da dieser Wert weit unter der nach *Norwegian Concrete 1999* nicht zu überschreitenden kritischen Temperatur infolge Hydratationswärme von 65 °C liegt ist sichergestellt, dass der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nano-dur[®]-Beton auch bei der Betonage nicht filigraner Bauteile nicht durch eine zu hohe Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme geschädigt wird.

Erwartungsgemäß sind die Maxima der beiden Kurven von M2 und M3 auf der Zeitachse im Vergleich zu M1 nach links verschoben.

Der Einfluss des Erhärtungsbeschleunigers beziehungsweise der verwendeten Menge auf die maximal auftretende Temperatur infolge Hydratationswärme ist marginal und zu vernachlässigen.

4.5.4 Frühe Entwicklung der Betonfestigkeiten in Abhängigkeit des Erhärtungsbeschleunigergehalts

Um die Schalfristen möglichst gering zu halten und die erforderlichen kostenintensiven Stahlschalungen dadurch wirtschaftlich auszunutzen, und um die Bauzeit der Parabolrinnenkraftwerke zu minimieren, steht die Steigerung der Betonfestigkeitsentwicklung stets im Fokus dieser Arbeit. Vor diesem Hintergrund wurde die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers untersucht. Dies wird im Folgenden beschrieben.

4.5.4.1 Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeit

An der TU Kaiserslautern wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um die Entwicklungen der Betonbiegezugfestigkeiten von M1, M2 und M3 miteinander vergleichen zu können. Hierzu wurden von jeder der drei Mischungen jeweils 48 Prismen der Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Die Prismen wurden bis zu ihrer Prüfung in den Schalungen belassen, welche bei Normklimabedingungen (20 °C, 65 % r. F.) gelagert wurden. Die freie Oberfläche wurde durch feuchte Lappen gegen Austrocknen geschützt, um die Bildung einer unebenen sogenannten „Elefantenhaut“ zu verhindern (DAfStb 2008). Nach dem Ausschalen wurden die Prismen im Dreipunktbiegeversuch getestet und so ihre Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5 bestimmt (vergl. Abb. 4.10).



Abb. 4.10: Dreipunktbiegeversuch nach DIN EN 12390-5

Die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers beeinflusst die Entwicklung des Betons in den ersten Stunden. Aus diesem Grund wurden seine Biegezugfestigkeit und seine Druckfestigkeit in Intervallen von 60 Minuten über einen Zeitraum von 16 Stunden ermittelt. Als Nullzeitpunkt wurde hierbei das Ende des Betonmischvorganges definiert.

Die Versuchsmatrix ist in der folgenden Tab. 4.18 dargestellt. Aufgeführt sind jeweils die an drei Proben bestimmten Mittelwerte.

Tab. 4.18: Versuchsmatrix Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeiten über die Zeit von M1, M2 und M3 (Mittelwerte aus je drei Prüfkörpern)

Betonalter [h]	Betonbiegezugfestigkeit [N/mm ²]															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,7	0,9	1,4	2,3	2,8
M2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,3	2,0	2,8	3,3	3,9	4,3	5,0
M3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,3	2,0	2,9	3,6	4,1	4,8	4,8	5,4	6,0

In Abb. 4.11 sind die Entwicklungen der Betonbiegezugfestigkeiten von M1, M2 und M3 über die Zeit mittels der Werte aus Tab. 4.18 einander graphisch gegenübergestellt.

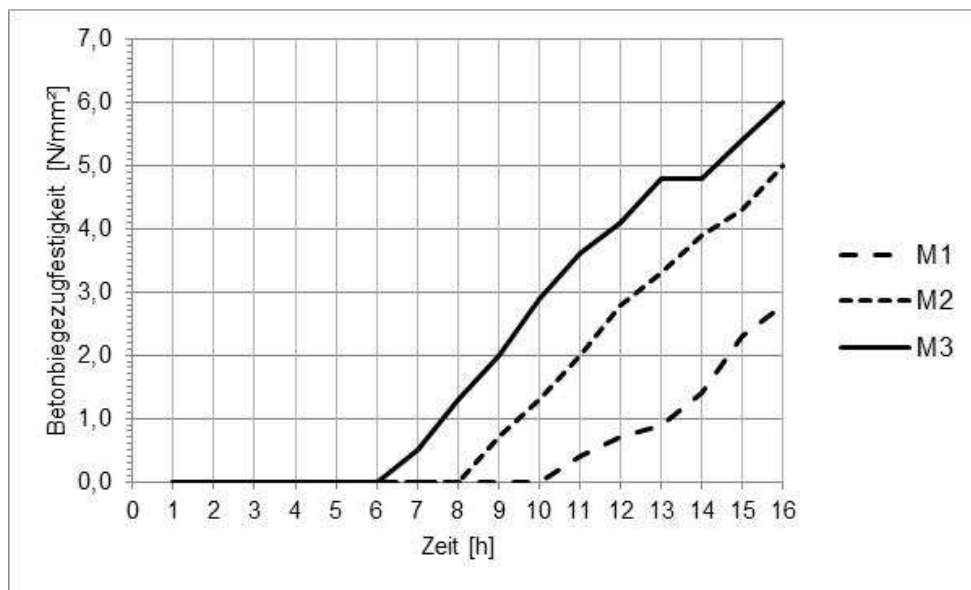


Abb. 4.11: Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeiten der Mischungen M1, M2 und M3

Erwartungsgemäß kann festgestellt werden, dass die Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeit von M1 über M2 zu M3 hin, also mit zunehmendem Erhärtungsbeschleunigergehalt, zeitlich früher einsetzt. Dabei verläuft die Festigkeitszunahme der Mischungen mit Erhärtungsbeschleuniger annähernd parallel und die Zunahme ist schneller als bei der Mischung ohne Erhärtungsbeschleuniger. Dies ist am steileren Kurvenanstieg erkennbar. Insgesamt ist die Wirksamkeit des Erhärtungsbeschleunigergehalts auf die Entwicklung der Festigkeit unterproportional (Müller 2014 d).

4.5.4.2 Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit

Nach Schmidt 2008 lässt sich die zentrische Biegezugfestigkeit f_{ct} wie folgt aus dem Biegezugversuch ermitteln:

$$f_{ct} = f_{ct,fi} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}}{1 + 2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}}$$

mit: $h_0 = 100 \text{ mm}$

$h =$ Prismenhöhe

$f_{ct,fl} =$ Randspannung bei Biegerissbildung (Elastizitätsgrenze) $[\text{N}/\text{mm}^2]$

Durch Anwenden dieser Gleichung ergeben sich aus Tab. 4.18 die nachfolgende Tab. 4.19 sowie Abb. 4.12.

Tab. 4.19: Zeitliche Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 nach Schmidt 2008

Betonalter [h]	Zentrische Betonzugfestigkeit $[\text{N}/\text{mm}^2]$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	1,2	1,4
M2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	1,0	1,4	1,7	2,0	2,2	2,6
M3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7	1,0	1,5	1,9	2,1	2,5	2,5	2,8	3,1

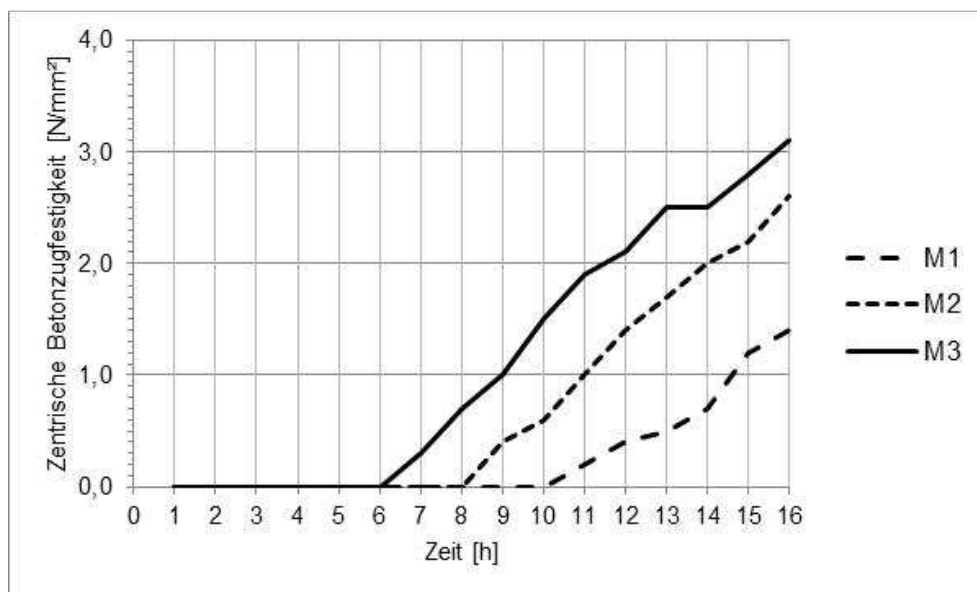


Abb. 4.12: Zeitliche Entwicklung der zentrischen Betonzugfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 (rechnerisch ermittelte Werte)

4.5.4.3 Entwicklung der Betondruckfestigkeit

Nachdem die drei Prismen zur Ermittlung ihrer Biegezugfestigkeiten im Dreipunktbiegezugversuch geprüft wurden, wurde an den sechs auf diese Weise erhaltenen Hälften in Anlehnung an *DIN EN 12390-3* die Betondruckfestigkeit ermittelt (vergl. Abb. 4.13).



Abb. 4.13: Ermittlung der Betondruckfestigkeit in Anlehnung an *DIN EN 12390-3*

Die Versuchsmatrix ist in der folgenden Tab. 4.20 dargestellt. Aufgeführt sind jeweils die an sechs Proben bestimmten Mittelwerte.

Tab. 4.20: Versuchsmatrix Entwicklung der Betondruckfestigkeiten über die Zeit von M1, M2 und M3 (Mittelwerte aus je sechs Prüfkörpern)

Betonalter [h]	Betondruckfestigkeit [N/mm ²]															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	3,8	4,8	8,3	12,9	16,3
M2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	3,9	6,4	9,8	13,3	16,9	21,1	21,6	27,3
M3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	4,3	9,1	13,1	17,1	21,0	24,9	26,3	29,1	32,7

In Abb. 4.14 sind die Entwicklungen der Betondruckfestigkeiten von M1, M2 und M3 über die Zeit mittels der Werte aus Tab. 4.20 einander graphisch gegenübergestellt.

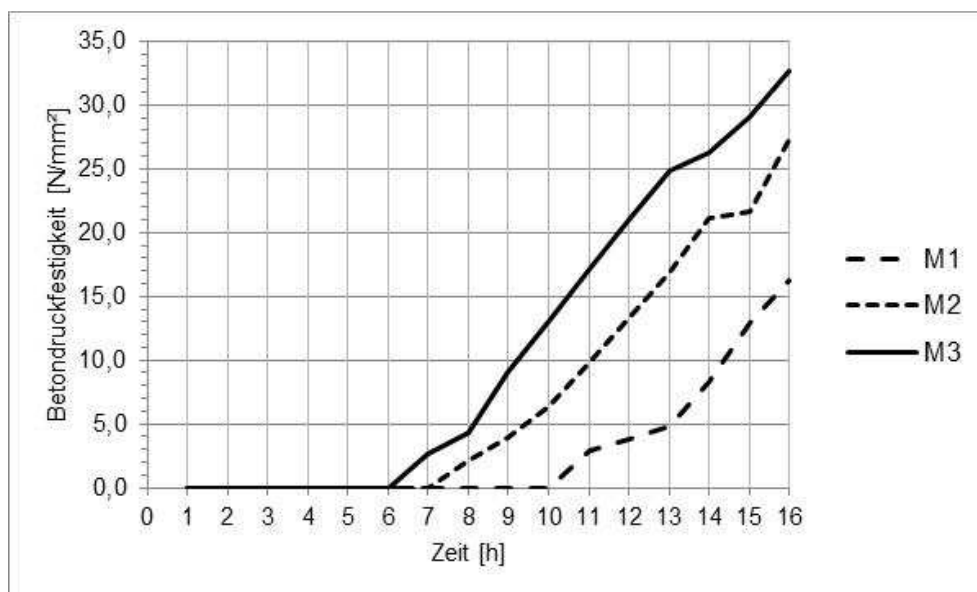


Abb. 4.14: Entwicklung der Betondruckfestigkeiten der Mischungen M1, M2 und M3

Die Zunahme von Betonbiegezugfestigkeit und Betondruckfestigkeit verläuft analog. Das Fazit ist daher dasselbe wie zuvor bereits bei den Versuchsergebnissen bezüglich der Betonbiegezugfestigkeit dargestellt:

Es kann festgestellt werden, dass die Entwicklung der Betondruckfestigkeit von M1 über M2 zu M3 hin, also mit zunehmendem Erhärtungsbeschleunigergehalt, zeitlich früher einsetzt. Dabei verläuft die Festigkeitszunahme der Mischungen mit Erhärtungsbeschleuniger annähernd parallel und die Zunahme ist schneller als bei der Mischung ohne Erhärtungsbeschleuniger. Dies ist am steileren Kurvenanstieg erkennbar. Die Wirksamkeit des Erhärtungsbeschleunigergehalts auf die Entwicklung der Betondruckfestigkeit ist, wie auch auf die der Betonzugfestigkeit, unterproportional (*Müller 2014 d*).

Die durch die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers erzielte Erhärtungsgeschwindigkeit war noch weiter zu steigern. Der Grund ist, dass die zu erzielende Taktzeit so gering wie möglich sein sollte. Aus diesem Grund wurde die Eignung eines Wärmebehandlungsregimes untersucht. Diese Untersuchungen werden im Folgenden erläutert.

4.5.5 Untersuchungen einer Wärmebehandlung

Wie bereits in *DAfStb 2008* zusammengefasst wird die Festigkeitsentwicklung durch eine Wärmebehandlung sehr stark beschleunigt. So erreicht man nach *Fehling 2005*, *Richard 1995* und *Schmidt 2003* durch eine Wärmebehandlung bei 90 °C mit einer Haltezeit dieser Temperatur von 48 Stunden nach dieser Zeit bereits eine höhere Festigkeit als nach 28 Tagen, wenn der Probekörper bei 20 °C im Wasserbad gelagert wurde. Nach *Goldbach 2008*, *Philip 2003* und *Schmidt 2007* wird ultrahochfester Beton im Fertigteilwerk häufig einer Wärmebehandlung unterzogen. Zum einen soll auf diese Art früh eine hohe Festigkeit erreicht werden, zum anderen soll das autogene Schwinden von Fertigteilen vorweg genommen werden, bevor diese montiert werden.

Ob ein solcher positiver Effekt in Bezug auf die Festigkeiten auch bei dem hier untersuchten Nanodur[®]-Beton zu verzeichnen ist, wurde untersucht, und ist im Folgenden beschrieben.

4.5.5.1 Einfluss der Probekörperlagerung und einer Wärmebehandlung auf die 28 Tage – Betonfestigkeiten

Anhand der verschiedenen Vorlagerungsbedingungen sollte der Einfluss des Feuchtezustandes und der Nachbehandlung der Probekörper sowie eines Wärmebehandlungsregimes auf die Betonfestigkeiten bestimmt werden.

Insgesamt wurden sechs Lagerungsarten im Folgenden miteinander verglichen: N1, N2 und N3 (keine Wärmebehandlung) und W1, W2 und W3 (Wärmebehandlung), jeweils mit einer Maximaltemperatur von 60 °C und 90 °C und dampfdicht eingepackten Probekörpern. Der Grund dafür ist, dass es bei der Ermittlung der Betonfestigkeiten hinsichtlich der Feuchte zum einen relevant ist, wieviel Feuchte den Probekörpern über den Zeitraum ihrer Lagerung von außen zugeführt wurde und zum anderen, wie groß der Wassergehalt des Betonkörpers zum Prüfzeitpunkt ist.

Zunächst wird die Lagerung der Probekörper ohne Wärmebehandlung beschrieben.

Es wurden drei in Tab. 4.21 dargestellte Lagerungsarten mit den Bezeichnungen N1, N2 und N3 variiert und deren Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften untersucht.

Tab. 4.21: Lagerung der Probekörper – ohne Wärmebehandlung

Lagerung	Dauer [d]		
	N1	N2	N3
Schalung	1	1	1
Wasser	27	6	–
Normklima 20 °C / 65 % r. F.	–	21	27

Im Folgenden wird das angewendete Wärmebehandlungsregime genauer erläutert.

Für die Untersuchungen mit einer 90 °C-Wärmebehandlung wurde in Anlehnung an *DAfStb 2008* und *Dyckerhoff 2012* der in Abb. 4.15 dargestellte Ablauf verfolgt. Mit einer Maximaltemperatur von 60 °C verlief dieser hierzu analog.

Nach *DAfStb 2008* ist das langsame Aufheizen und Abkühlen des Betons sehr wichtig, da andernfalls die erzielte Verbesserung der Mikrostruktur durch thermisch bedingte Mikrorisse wieder aufgehoben werden kann. So wurde eine mittlere Aufheizrate von 0,5 K/min und eine mittlere Abkühlrate von 0,15 K/min verfolgt. Der stufenförmige Verlauf hierbei resultiert aus der Steuerung des verwendeten Ofens. Die Aufheizphase dauerte insgesamt 140 Minuten, die Abkühlphase rund 467 Minuten.

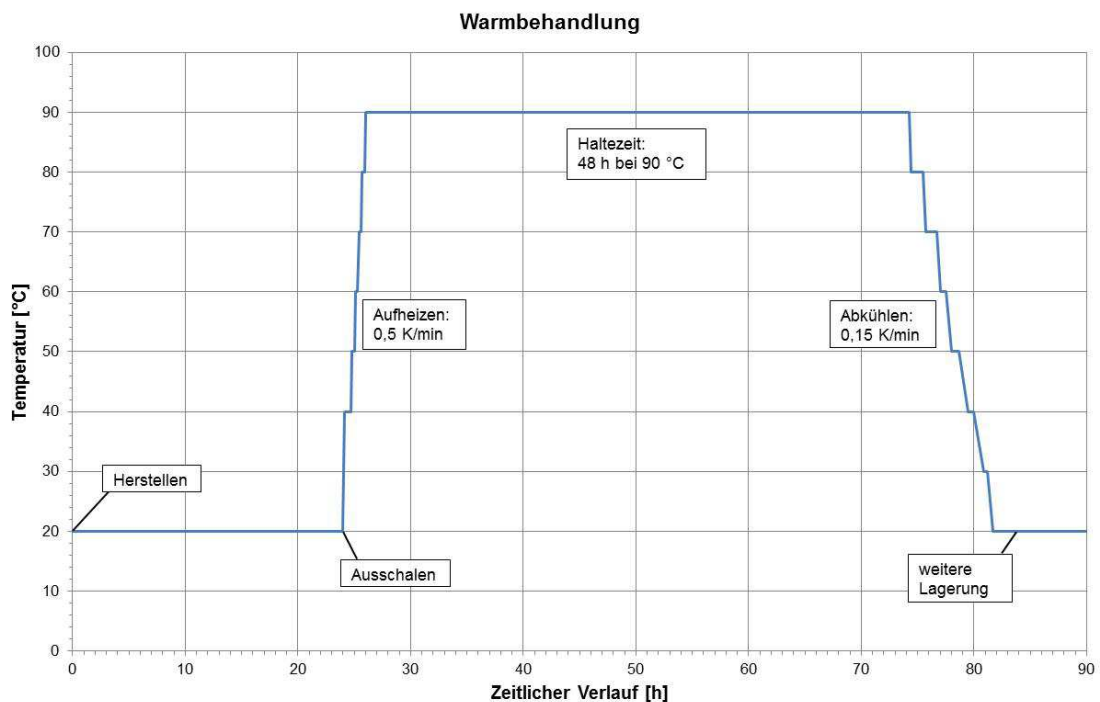


Abb. 4.15: Durchgeführtes Wärmebehandlungsregime mit einer Maximaltemperatur von 90 °C

Die Probekörper wurden 24 Stunden nach Mischende ausgeschalt.

Die dampfdicht zu verpackenden Betonprobekörper wurden unmittelbar nach dem Ausschalen mit einem feuchten Tuch umwickelt und in Folie eingewickelt.

Anschließend wurden die Proben im Wärmeschrank entsprechend dem oben abgebildeten Temperaturregime warmbehandelt (vergl. Abb. 4.16).



Abb. 4.16: Probekörper (nicht gegen Austrocknung geschützt) bei der Wärmebehandlung

Auch bei den Untersuchungen mit warmbehandeltem Nanodur[®]-Beton wurden drei in Tab. 4.22 dargestellte Lagerungsarten mit den Bezeichnungen W1, W2 und W3 verglichen.

Tab. 4.22: Lagerung der Probekörper – mit Wärmebehandlung

Lagerung	Dauer [d]		
	W1	W2	W3
Schalung	1	1	1
Aufheizphase	0,1	0,1	0,1
Haltezeit	2	2	2
Abkühlphase	0,3	0,3	0,3
Wasser	24,6	3,6	–
Normklima 20°C / 65 % r. F.	–	21	24,6

Unmittelbar nach der Abkühlungsphase wurde das die Probekörper dampfdicht verpackende Material entfernt, und die Probekörper aller drei Versuchsreihen wurden ihrer jeweiligen Lagerung bis zur Prüfung nach 28 Tagen unterzogen.

Die Bestimmung der Betondruckfestigkeiten erfolgte dabei nach *DIN EN 12390-3* an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm.

Die Biegezugprüfung wurde an Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm durchgeführt. Deren Herstellung und Prüfung im Dreipunkt-Biegeversuch erfolgte nach *DIN EN 196-1* und in Anlehnung an *DIN EN 12390-5*.

Die Berechnung der zentrischen Biegezugfestigkeit aus den experimentell ermittelten Biegezugfestigkeiten erfolgte, wie oben bereits beschrieben, nach *Schmidt 2008*.

Die Prüfergebnisse sind in Tab. 4.23 sowie in den Abb. 4.17 bis Abb. 4.21 dargestellt.

Anhand der verschiedenen Vorlagerungsbedingungen sollte der Einfluss des Feuchtezustandes und der Nachbehandlung der Probekörper sowie eines Wärmebehandlungsregimes bei zwei unterschiedlichen Maximaltemperaturen auf die Festigkeiten bestimmt werden.

Es sind stets die Mittelwerte aufgetragen. Es wurden jeweils drei Probekörper geprüft. Lediglich bei der Stempeldruckfestigkeit, also der Druckfestigkeit gemessen am Prisma mittels eines Druckstempels der Abmessungen 40 mm x 40 mm, wurden sechs Werte ermittelt.

Tab. 4.23: Mittelwerte der 28 d-Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

Lagerungsart		Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ [N/mm ²]	Zentr. Zugfestigkeit f_{ctm} [N/mm ²]	Stempeldruckfestigkeit $f_{c,Prisma}$ [N/mm ²]
N1		104,8	18,9	9,7	113,2
W1	60 °C	109,4	19,3	9,9	114,2
	90 °C	100,5	19,0	9,8	115,6
N2		113,8	12,4	6,4	119,3
W2	60 °C	102,8	13,9	7,1	124,5
	90 °C	96,8	14,1	7,2	112,8
N3		94,3	12,3	6,3	106,1
W3	60 °C	82,5	12,9	6,6	121,5
	90 °C	95,8	17,4	8,9	122,9

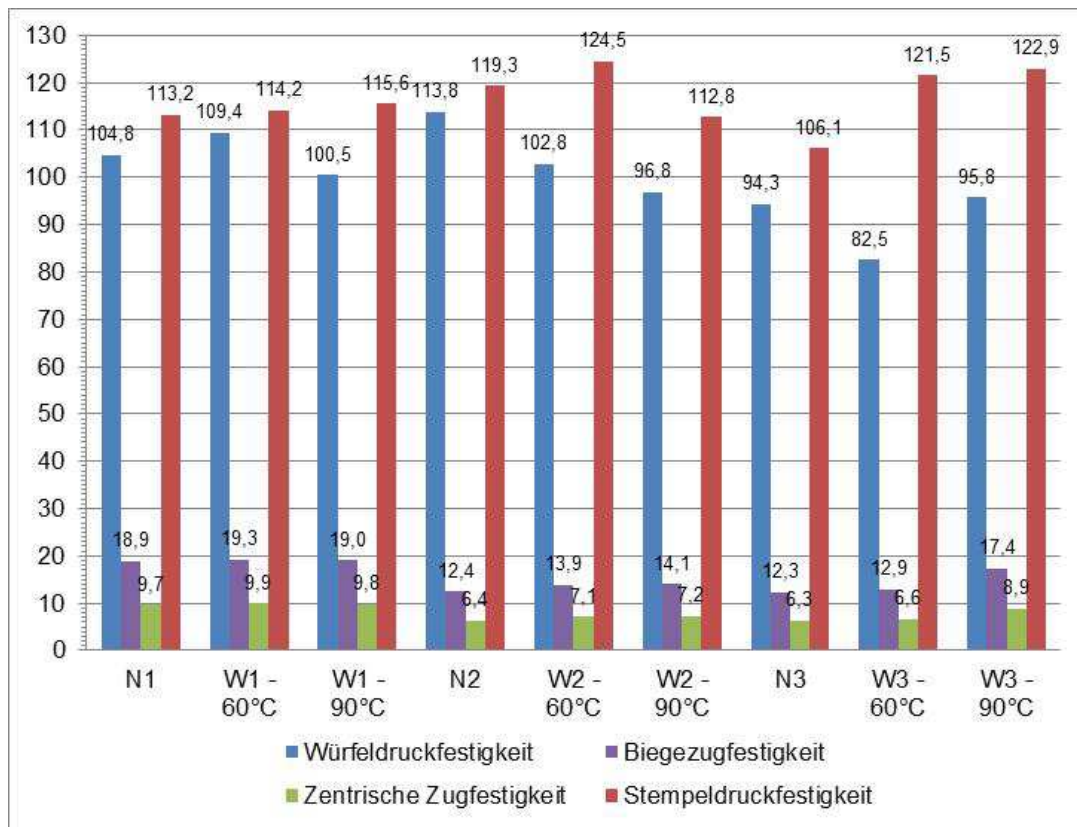


Abb. 4.17: Betonfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

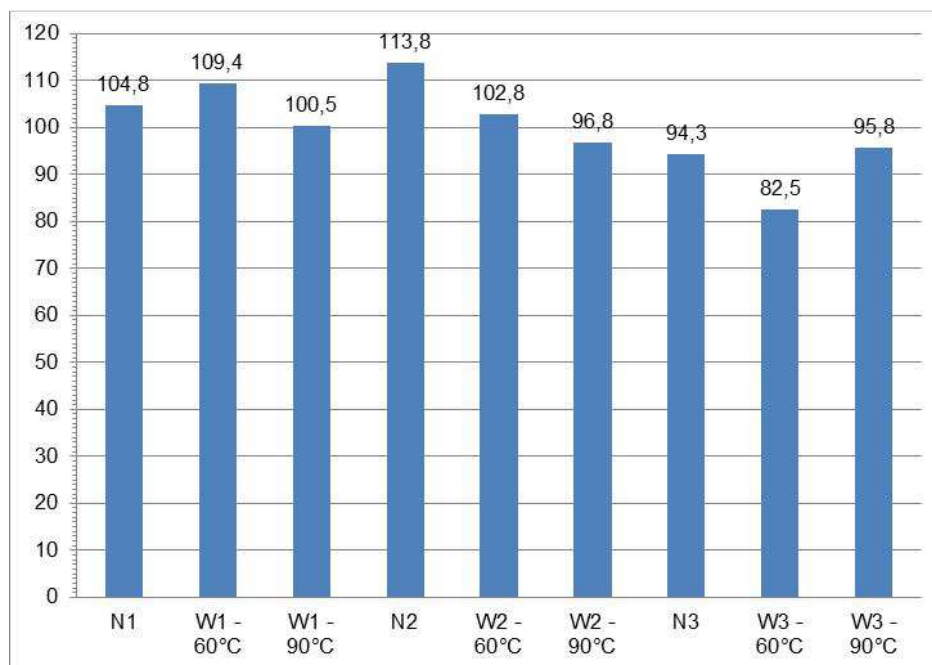


Abb. 4.18: Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

Die Würfeldruckfestigkeit der N2-gelagerten Probekörper liegt oberhalb derer aller warmbehandelten. Ein positiver Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Betondruckfestigkeit lässt sich also nicht ableiten.

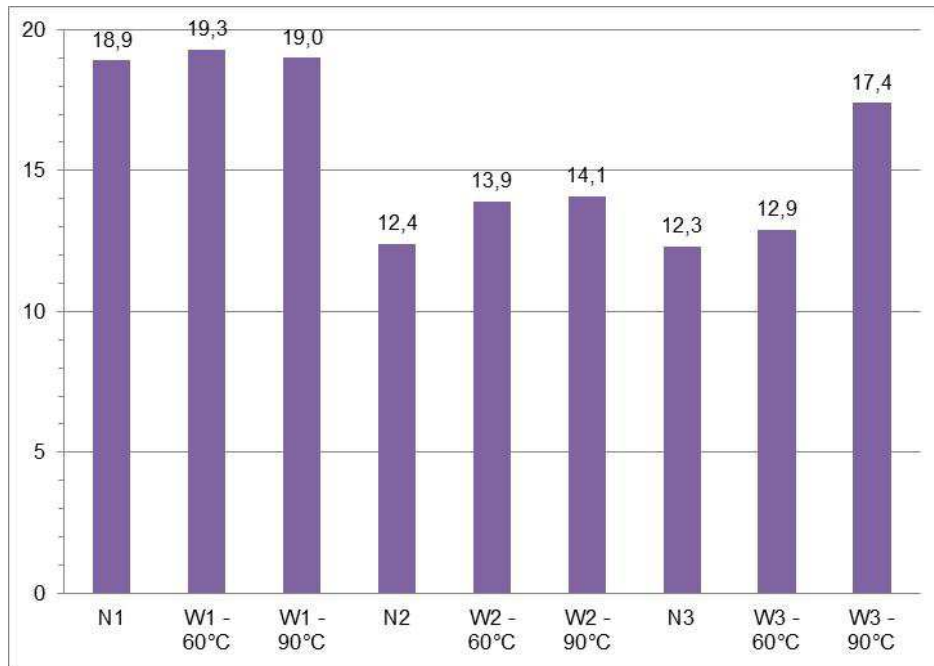


Abb. 4.19: Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

Der höchste Wert der Biegezugfestigkeit wurde bei einer Wärmebehandlung mit 60 °C und einer anschließenden Lagerung W1 erzielt. Der Festigkeitszugewinn gegenüber N1 ist jedoch vernachlässigbar, sodass der Aufwand einer Wärmebehandlung zur Steigerung der Biegezugfestigkeit nicht gerechtfertigt scheint.

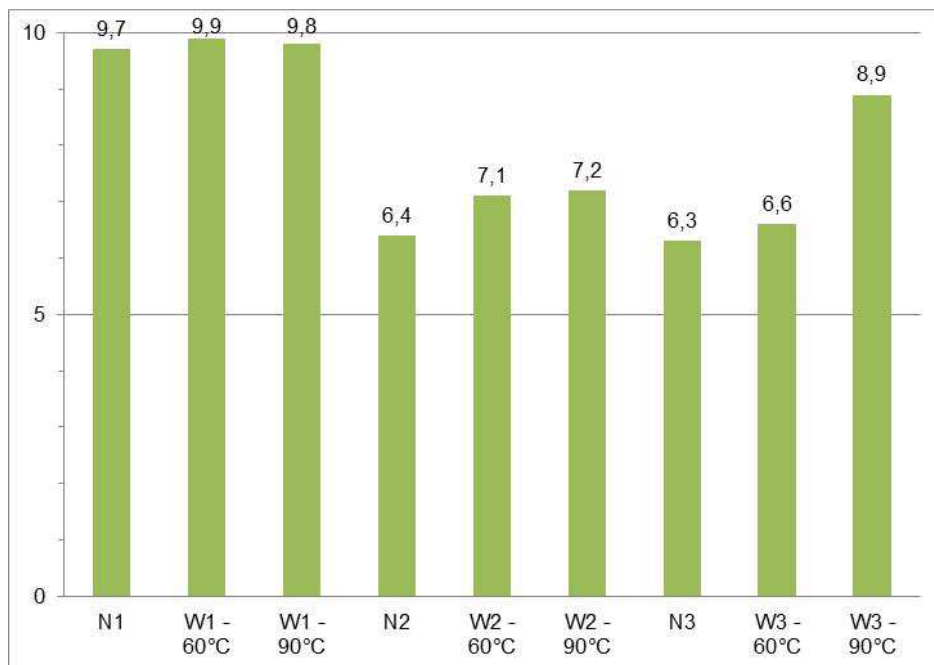


Abb. 4.20: Berechnete zentrische Zugfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

Wie oben bereits erwähnt wurde die zentrische Zugfestigkeit aus der experimentell ermittelten Biegezugfestigkeit rechnerisch ermittelt. Das Fazit ist daher dasselbe wie für die Biegezugfestigkeit.

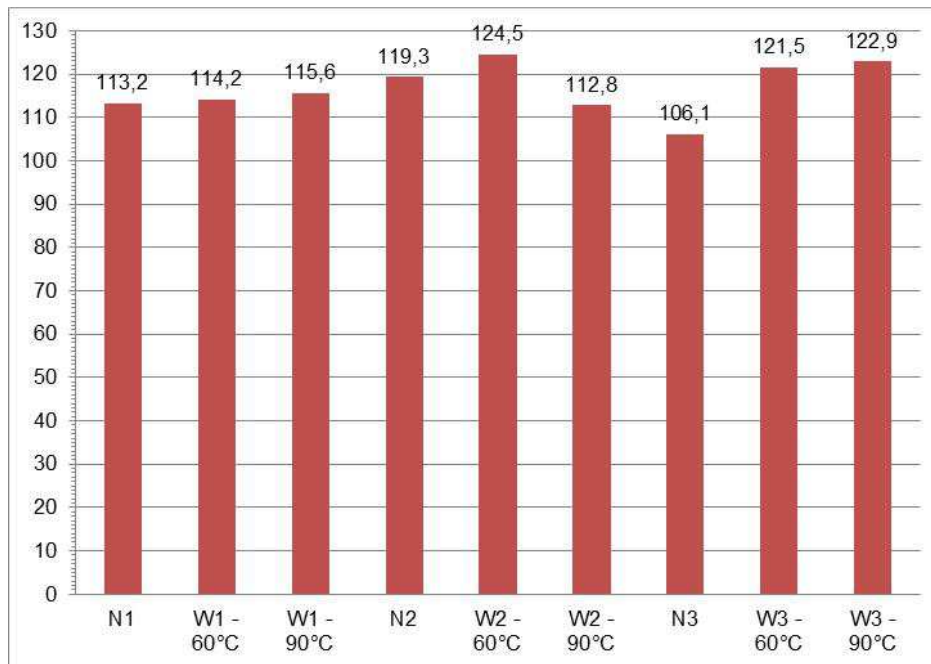


Abb. 4.21: Stempeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Probekörperlagerung und des Wärmebehandlungsregimes

Die am Prisma ermittelten Werte der Betondruckfestigkeit liegen über den am Würfel ermittelten Werten. Dies ist stimmig, da bei kleineren Probekörpern der Einfluss des mehraxialen Spannungszustandes, welcher durch an den Prüfflächen entstehende Reibung erzeugt wird, einen größeren Einfluss hat. Die Steigerung der Festigkeiten von warmbehandelten Probekörpern gegenüber nicht warmbehandelten ist auch an dieser Stelle marginal.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die beiden unterschiedlichen angewendeten Wärmebehandlungsregimes keine systematische Steigerung der Betonfestigkeiten erkennbar ist. Vorteile einer Wärmebehandlung für die Serienproduktion von Parabolrinnen aus Nanodur[®]-Beton, die eine immer mit großem Aufwand und Kosten verbundene Wärmebehandlung wirtschaftlich rechtfertigen würden, lassen sich anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht herausstellen.

Nach Angaben der Dyckerhoff AG decken sich deren Erfahrungen mit den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Versuchsergebnissen. Dies kann so begründet werden, dass bei Nanodur[®]-Beton nur Zemente, nicht aber Mikrosilika Verwendung findet. Die Anwendung eines Wärmebehandlungsregimes ist in Bezug auf die Betonfestigkeiten nur bei gleichzeitiger Verwendung von Mikrosilika in der Betonrezeptur sinnvoll.

4.5.5.2 Einfluss eines Austrocknungsschutzes während der Wärmebehandlung auf die Betonfestigkeiten

In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit sich die Betonfestigkeiten warmbehandelter, dampfdicht verpackter Probekörper von denen unverpackter Probekörper unterscheiden. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Der Hintergrund ist folgender: Bei der Ermittlung der Betonfestigkeiten sind hinsichtlich der Feuchte zwei unterschiedliche Effekte zu berücksichtigen: Zum einen ist es von Bedeutung, wie die Proben gelagert wurden, also wieviel Feuchte ihnen über den Zeitraum ihrer Lagerung von außen zugeführt wurde. Zum anderen ist es entscheidend, wie groß der Wassergehalt des Betonkörpers zum Prüfzeitpunkt ist. Nach Erfahrungen, wie sie beispielsweise bei der Dyckerhoff AG gemacht wurden, sind die an trockenen Prüfkörpern ermittelten Betondruckfestigkeiten höher als die an nass geprüften. Folgende Erklärung kann hierfür gegeben werden: Die Wassertropfen schwächen den Körper wie ein Schmiermittel und reduzieren dadurch seine Druckfestigkeit. Bei der Biegezugfestigkeit verhält es sich umgekehrt: Ein nass geprüftes Prisma liefert eine höhere Biegezugfestigkeit als ein beim Prüfzeitpunkt trockenes. Ein Erklärungsmodell ist, dass die wassergefüllten Poren bei Bauteilverformung zu einer Art Druckvorspannung führen.

Hierzu wurde eine Versuchsreihe mit der Mischung M1 durchgeführt:

Wärmebehandlung mit einer Maximaltemperatur von 90 °C mit dampfdicht verpackten Betonprobekörpern.

Wärmebehandlung mit einer Maximaltemperatur von 90 °C mit unverpackten Betonprobekörpern.

Wärmebehandlung mit einer Maximaltemperatur von 60 °C mit dampfdicht verpackten Betonprobekörpern.

Wärmebehandlung mit einer Maximaltemperatur von 60 °C mit unverpackten Betonprobekörpern.

In der nachfolgenden Tab. 4.24 und Abb. 4.22 sind stets die Mittelwerte von drei Prüfkörpern aufgeführt.

Tab. 4.24: Vergleich dampfdicht verpackter (G) und ungeschützter (NG) Lagerung während der Wärmebehandlung

	60 °C G	60 °C NG	90 °C G	90 °C NG
Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ [N/mm ²]	12,6	14,2	12,7	15,4
Zentr. Zugfestigkeit f_{ctm} [N/mm ²]	6,5	7,3	6,5	8,0
Stempeldruckfestigkeit $f_{c,Prisma}$ [N/mm ²]	105,6	116,2	110,7	123,6

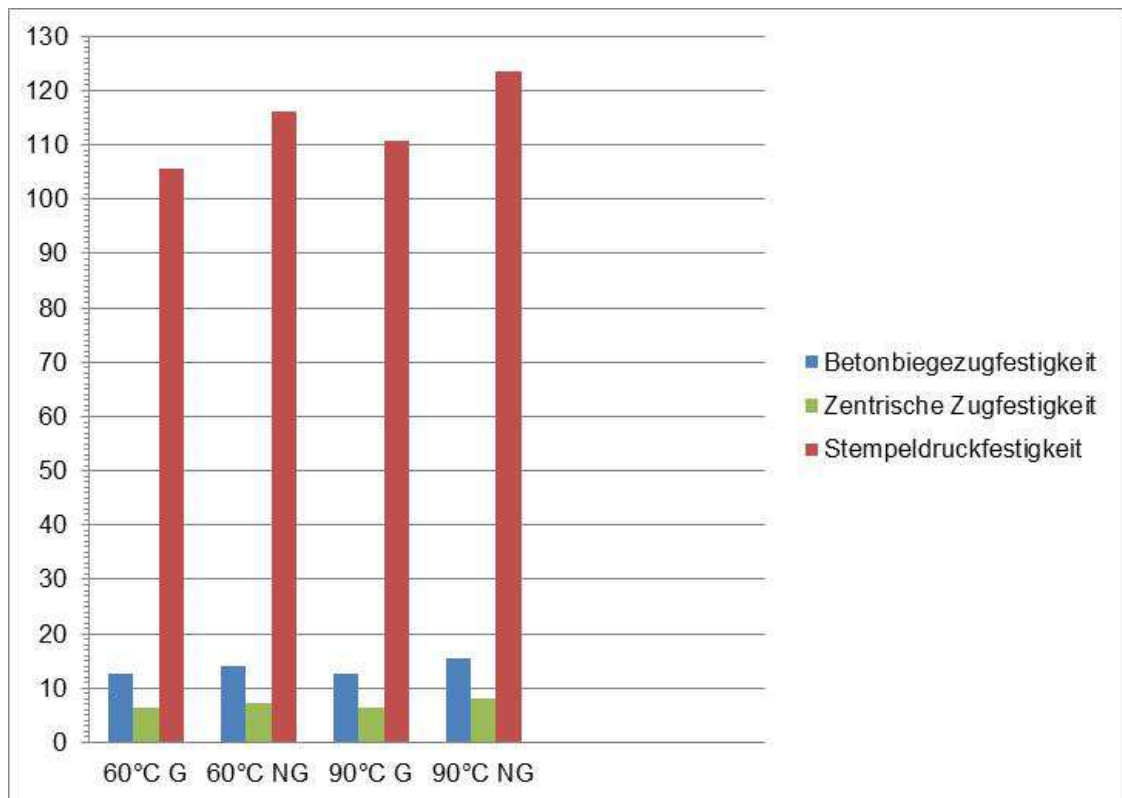


Abb. 4.22: Einfluss eines Austrocknungsschutzes auf die Betonfestigkeiten

Die Versuchsergebnisse bei der Betondruckfestigkeit decken sich mit den Erfahrungen und Erwartungen. Die ungeschützten und daher trockeneren Prismen wiesen höhere Druckfestigkeiten als die feuchteren Prismen auf.

Die Beobachtungen bei der Biegezugfestigkeit widersprechen den bisherigen Erfahrungen. Nach diesen hätten die dampfdicht verpackten Prismen höhere Biegezugfestigkeiten aufweisen müssen, als die unverpackten. Dies war jedoch nicht der Fall.

Dieses beobachtete Phänomen lässt sich derzeit noch nicht erklären. Aus diesem Grund sind weiterführende Versuchsreihen durch die Dyckerhoff AG in Vorbereitung.

Eine Wärmebehandlung wird nicht weiter verfolgt.

4.5.6 Elastizitätsmodul unter Druckbelastung (Sekantenmodul)

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls $E_{c,s}$ (Sekantenmodul) erfolgte gemäß *DIN EN 12390-13* an dreizehn Betonzylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm.

Der Mittelwert betrug $E_{c,s} = 47.593,1 \text{ N/mm}^2$.

4.5.7 Karbonatisierung

Nach *Visser 2012* ist die Korrosion der Bewehrung der bei Stahlbeton am weitesten verbreitete Schädigungsmechanismus. Die Korrosion wird durch die Zerstörung der Passivierungsschicht auf der Betonstahloberfläche ausgelöst. Dies kann durch die Karbonatisierung des die Bewehrung umgebenden Betons geschehen, welche zu einem Absinken des pH-Wertes führt. Der pH-Wert fällt vom im intakten Beton hoch-

alkalischen Milieu mit einem pH-Wert von etwa 13 auf einen Wert von unter neun (Glass 1991).

4.5.7.1 Allgemeines zur Karbonatisierung von Beton

Wie bereits in Visser 2012 zusammengefasst kann der Karbonatisierungsmechanismus nach Thiery 2007 und Maekawa 2003 wie folgt beschrieben werden: Die Karbonatisierung beginnt von der Betonoberfläche her durch deren Durchdringung mit CO_2 . Nach der Diffusion dieses Gases in den Beton löst sich dasselbe im Betonporenwasser als Kohlensäure H_2CO_3 , welche in HCO_3^- und CO_3^{2-} dissoziiert. Die Konzentration hängt vom pH-Wert des Betonporenwassers, der umgebenden CO_2 -Konzentration und den weiteren darin enthaltenen Stoffen, insbesondere den Alkalien, ab. Diese Dissoziation verringert den pH-Wert des Betonporenwassers, da auch H_3O^+ produziert wird. Das gelöste Ca^{2+} reagiert mit dem CO_3^{2-} zu festem CaCO_3 , welches sich in den Porenräumen absetzt. Sowohl die Reduktion des pH-Wertes nach der Dissoziation von H_2CO_3 als auch die Abnahme der Calciumkonzentration nach dem Ausfallen der Calciumcarbonate führen zum Auflösen des $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Durch diese Auflösung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ist der pH-Wert in der Betonporenwasserlösung relativ konstant. Zusätzlich zum Calciumhydroxid wird Calcium auch aus den anderen calciumhaltigen Zementphasen wie CSH, Ettringit und Monosulfathydrat gelöst. Mit fortschreitendem Verbrauch des Calciums aus den leicht löslichen Bestandteilen des erhärteten Zementleims und Absetzen des nahezu unlöslichen Calciumcarbonats bleiben schlussendlich keine leicht löslichen Komponenten mehr übrig. Von diesem Zeitpunkt an kann der pH-Wert nicht mehr steigen und ein neues Gleichgewicht mit der an der Betonoberfläche herrschenden CO_2 -Konzentration wird gebildet. Während dieses chemischen Prozesses wird auf der einen Seite Wasser benötigt, um das CO_2 zu dissoziieren. Auf der anderen Seite wird jedoch auch, unter anderem von festem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, zuvor gebundenes Wasser freigesetzt.

In den meisten Fällen existiert eine enge Reaktionsschicht, in welcher der Großteil der Karbonatisierungsreaktion stattfindet, und welche von der Betonoberfläche aus zum Bauteilkern hin fortschreitet. Zwischen der Bauteiloberfläche und der Reaktionsschicht ist der Beton vollständig karbonatisiert, während der Beton in größeren Tiefen als der Reaktionsfront unbeeinflusst ist. Seitdem die Existenz einer sehr dünnen Karbonatisierungszone für eine große Spanne von Bedingungen experimentell bewiesen wurde (Peter 2008), wird dieselbe in der Regel als sprunghafte Änderung der CO_2 -Konzentration modelliert. Der Grund hierfür ist, dass die Karbonatisierungsreaktion jedes CO_2 -Moleküls, welches in einem noch nicht vollständig karbonatisierten Bereich neu ankommt, sofort umwandelt. Daher muss zuerst sämtliches karbonatisierbares Material reagieren, bevor die Kohlenstoffdioxidmoleküle tiefer in den Beton eindringen können. Aufgrund der einfachen Handhabung und der Tatsache, dass die verwendete Messmethode aus dem Aufsprühen von Phenolphthalein besteht, welches seine Farbe bei einem pH-Wert von 8,2 verändert, wird diese schmale Zone in der Regel als geradlinige Front modelliert und als Karbonatisierungsfront bezeichnet. Abweichungen in dieser Karbonatisierungsfront werden im Regelfall durch Abweichungen in der Mikrostruktur des erhärteten Zementleimes wie beispielsweise lokale Variationen hinsichtlich der Menge an zur Verfügung stehendem Reaktionsmaterial, des Sättigungsgrades sowie der Gasdiffusion fördernder Mikrorisse verursacht.

Die Zeit, die die Karbonatisierungsfront benötigt, um die Bewehrungsstäbe zu erreichen und deren Passivitätsschicht zu zerstören, wird als Korrosionsinitiationszeit bezeichnet. Bei der Planung der Lebensdauer eines Bauteils wird in der Regel gefordert, dass die Zeit der Korrosionsinitiation infolge von Karbonatisierung größer ist als die geforderte Lebensdauer. Die darauf folgende Phase der Bewehrungskorrosion kann sehr kurz sein. Die Konsequenzen eines möglichen Versagens infolge unmerkter Korrosion können weitreichend sein. Erforderliche Reparaturen sind äußerst kostenintensiv. Es ist daher zu vermeiden, dass die Karbonatisierungsfront die Bewehrung innerhalb der erwarteten Lebensdauer erreicht, sofern es sich um metallische Bewehrung handelt.

Nach *RILEM 1988* werden auch weitere Betoneigenschaften wie die Festigkeiten, die Durchlässigkeit und der Widerstand gegen chemische und physikalische Angriffe sowie das Schwindverhalten durch die Karbonatisierung beeinflusst.

4.5.7.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm wurde in Anlehnung an *DAfStb 1991*, *DIN CEN/TS 12390-10*, *Visser 2012* und *RILEM 1988* aufgestellt und durchgeführt.

Ziel war es, die Tiefe der karbonatisierten Schicht d_k (vergl. Abb. 4.23) an der Oberfläche des erhärteten Betons der drei unterschiedlichen Mischungen durch Verwendung eines Indikators zu bestimmen.

Hierzu wurden Prüfkörper im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern hergestellt. Die hier vorgestellte und angewendete Prüfmethode eignet sich nicht nur zur Prüfung von im Labor hergestellten Probekörpern, sondern auch zur Verwendung bei an fertigen Bauwerken entnommenen Prüfkörpern und zur Anwendung auf der Baustelle (*RILEM 1988*).

Prüfungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern werden im Allgemeinen dazu verwendet, die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von verschiedenen Betonrezepturen unter definierten Umgebungsbedingungen zu vergleichen. Es sind Untersuchungen auf der Baustelle oder an Bauwerksproben im Allgemeinen notwendig, um Informationen über den Zustand eines Bauwerks oder eines Bauteils zu einem bestimmten Zeitpunkt unter den vor Ort herrschenden Umgebungsbedingungen zu erlangen. Aufgrund der möglicherweise auftretenden großen Streuung der Karbonatisierungstiefe und wegen der zahlreichen Einflussfaktoren sind diese am Bauwerk oder Bauteil durchgeführten Untersuchungen nicht dafür geeignet, verschiedene Betone miteinander zu vergleichen, sondern sind nur für das untersuchte Bauwerk oder Bauteil zutreffend (*RILEM 1988*).

Nach *Visser 2012* kann der Karbonatisierungsprozess beschleunigt werden. Die einfachste Möglichkeit, dies zu realisieren, ist die Erhöhung der CO_2 -Konzentration. Der natürliche CO_2 -Gehalt der Luft beträgt etwa 0,04 %. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Konzentration der die Probekörper umgebenden Luft auf 2,0 % erhöht, um die Karbonatisierungsgeschwindigkeit auf das 50-fache der Geschwindigkeit zu beschleunigen, mit der dieser Schädigungsmechanismus unter normalen Umgebungsbedingungen im Freien abläuft. Dadurch können mit einer Dauer der Versuche von sechs Monaten dieselben Auswirkungen auf den untersuchten Beton infolge von Karbonatisierung simuliert werden, die unter normalen Umgebungsbedingungen im

Freien nach 25 Jahren auftreten würden, was der derzeitigen planmäßigen Lebensdauer von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke entspricht (vergleiche Kapitel 2.2.6).

4.5.7.3 Herstellen der Versuchskörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Von allen drei Mischungen M1, M2 und M3 wurden jeweils neun Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm unter Normklimabedingungen (20 °C / 65 % relative Feuchte) hergestellt.

In *RILEM 1988* wird gefordert, dass die kleinste Prismenabmessung nicht kleiner als das Dreifache des Größtkorndurchmessers ist. Diese geforderten Mindestabmessungen waren somit eingehalten.

Des Weiteren ist darauf zu achten, sämtliche unerwünschten Effekte auf der Betonoberfläche zu vermeiden, weshalb bei der Herstellung der Prüfkörper die Verwendung eines Schalungstrennmittels auf ein Minimum beschränkt wurde.

Alle Prismen wurden 24 Stunden nach ihrer Betonage ausgeschalt und unmittelbar darauf für weitere 27 Tage bei Normklimabedingungen gelagert.

Anschließend wurden von jeder Mischung jeweils drei Prismen mit einem Betonalter von nun 28 Tagen nach ihrer Vorlagerung unter Normklimabedingungen einem künstlich erhöhten Kohlenstoffdioxidmilieu mit einer CO₂-Konzentration von 2,0 % ausgesetzt, um den Karbonatisierungsprozess beschleunigt ablaufen lassen zu können.

Drei weitere Prismen jeder Mischung wurden in der Klimakammer unter Normklimabedingungen belassen.

Die anderen drei Prismen jeder Mischung wurden ohne Schutz vor der Witterung auf dem Dach der Versuchshalle in Kaiserslautern den dort im Zeitraum von Mai bis November herrschenden Umgebungsbedingungen ausgesetzt (vergl. Abb. 4.23).



Abb. 4.23: oben links: Prismen im Prüfschrank mit erhöhtem CO₂-Gehalt, unten links: Prismen unter Normklimabedingungen, rechts: Prismen unter Umgebungsbedingungen im Freien

Von M1 wurden zusätzlich neun Prismen hergestellt und dem oben beschriebenen Wärmebehandlungsregime unterzogen. Im Anschluss daran wurden jeweils drei dieser Prismen wie oben beschrieben unter Normklima, unter erhöhtem CO₂-Gehalt sowie unter Witterungsbedingungen im Freien gelagert, um auf diese Weise den Einfluss einer Wärmebehandlung auf das Karbonatisierungsverhalten beurteilen zu können.

Nach *RILEM 1988* reagiert das Kohlenstoffdioxid, welches die Oberfläche des Betons durchdringt, mit den alkalischen Komponenten des Zementleims hauptsächlich mit dem Ca(OH)₂. Dieser Prozess der Karbonatisierung führt zu einer Reduktion des pH-Wertes von unter neun in der Porenlösung. Die Tiefe der karbonatisierten Schicht wird als Karbonatisierungstiefe d_k bezeichnet (vergl. Abb. 4.24).

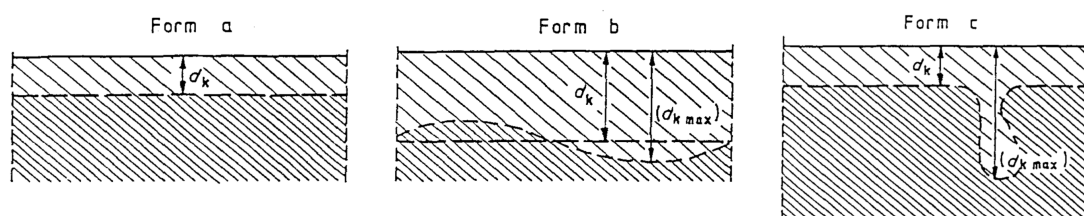


Abb. 4.24: Definitionen der Karbonatisierungstiefe d_k (Quelle: *RILEM 1988*)

Die Verringerung des pH-Wertes kann mittels der Farbveränderung eines geeigneten Indikators sichtbar gemacht werden. Im Rahmen der hier beschriebenen Versuche

wurde als solcher wie in *DAfStb 1991* empfohlen, eine einprozentige Lösung von Phenolphthalein verwendet. Für diese wurden 10 g Phenolphthalein in 990 g Ethanol gelöst. Phenolphthalein färbt nicht-karbonatisierten Beton rot und bleibt in karbonatisiertem Beton farblos.

Mit der Phenolphthalein verwendenden Indikatormethode ist es nicht möglich, zu bestimmen, ob die Reduzierung des pH-Wertes durch andere Einflüsse als der Aufnahme von CO_2 , wie SO_2 , HCl oder anderen sauren Gasen, erfolgte. Solche Einflussfaktoren waren bei den Umgebungsbedingungen, die bei der hier beschriebenen Versuchsreihe vorherrschten, jedoch ausgeschlossen.

Für jede Messung wurde nach *RILEM 1988* am Tag der Messung eine Scheibe mit einer Länge von etwa 20 mm von den Prismen abgebrochen. Damit war gewährleistet, dass kein von der Endoberfläche eindringendes Kohlenstoffdioxid die von den Seitenoberflächen ausgehenden Messungen beeinflusste. Die gebrochene Oberfläche wurde unmittelbar nach dem Brechen von Staub und losen Partikeln befreit. Anschließend wurde die Indikatorlösung aufgesprüht.

Die Messung wurde nach *RILEM 1988* nach einem Zeitraum von 24 Stunden nach dem Aufsprühen des Indikators durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt eine optische Differenzierung zwischen karbonatisiertem und nicht-karbonatisiertem Beton besser möglich war als unmittelbar nach dem Aufbringen der Phenolphthaleinlösung.

Die Karbonatisierung wurde an beiden Bruchflächen an jeweils 15 gleichmäßig über die Kanten verteilten Messstellen ermittelt. An den Betoneinfüllseiten wurden aufgrund der dort stets vorhandenen Lunker und Unebenheiten keine Messungen durchgeführt (vergl. Abb. 4.25).

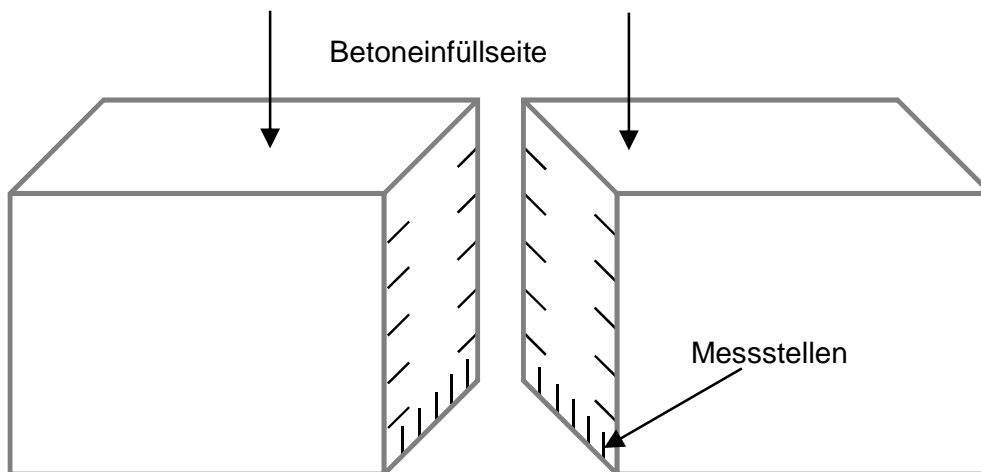


Abb. 4.25: Messstellen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe am gespaltenen Prisma

Die Messungen wurden 28, 60, 90, 120 und 180 Tage nach dem Erstkontakt des Betons mit CO_2 durchgeführt. Damit wurden mehr Messungen durchgeführt als nach *RILEM 1988* (28, 90, 180 Tage) für Normalbeton gefordert.

4.5.7.4 Versuchsergebnisse und -auswertung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Bestimmung der Karbonatisierungstiefen in Tabellenform und grafisch dargestellt (vergl. Tab. 4.25 und Abb. 4.26). Dabei sind stets die Mittelwerte aus drei Messwerten aufgetragen.

Bei M1_W handelt es sich um die warmbehandelten Probekörper.

Alle Prismen wurden 28 Tage unter Normklimabedingungen vorgelagert, bevor sie den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt wurden.

Tab. 4.25: Gegenüberstellung der Karbonatisierungstiefen von M1, M1_W (warmbehandelt), M2 und M3 nach 180 Tagen Lagerung unter Normklimabedingungen, Lagerung bei 2 % CO₂-Gehalt und Lagerung im Freien

	Karbonatisierungstiefe [mm]			
	M1	M1_W	M2	M3
Normklima	1,722	1,299	2,203	2,042
Im Freien	0,272	0,579	0,334	0,481
2 % CO ₂	1,847	1,731	2,628	3,169

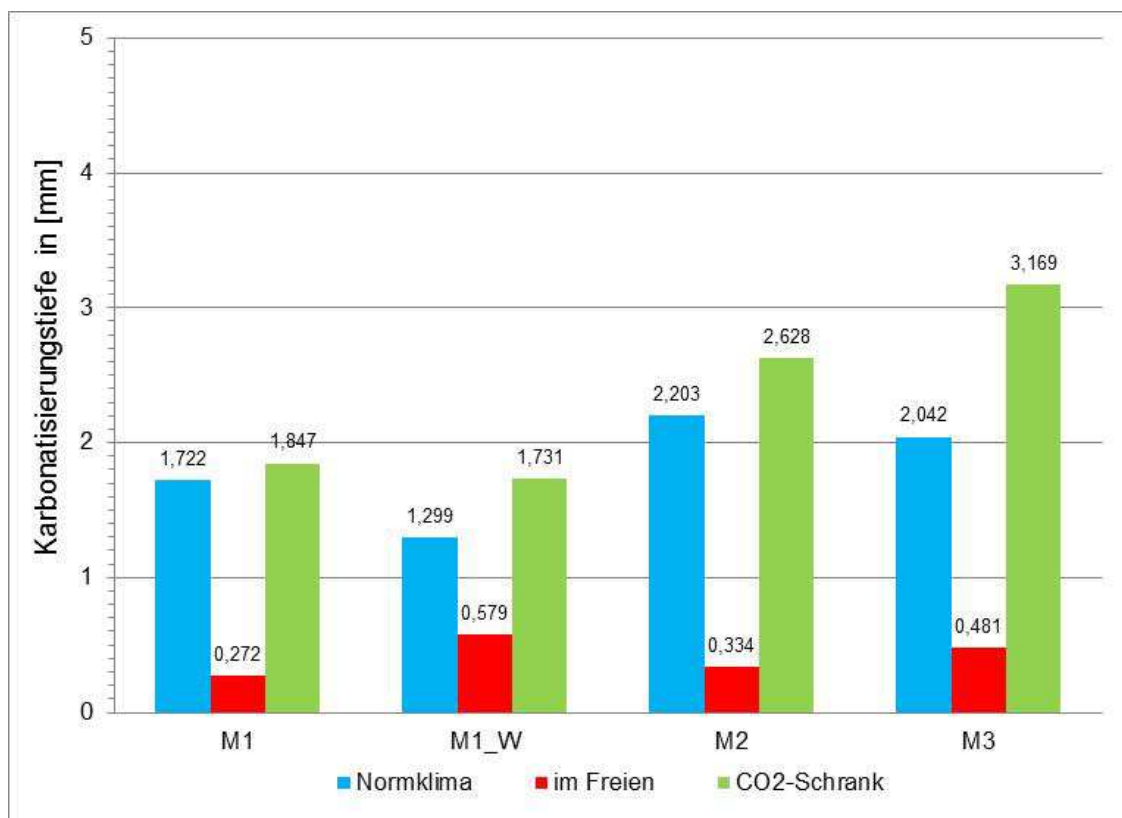


Abb. 4.26: Gegenüberstellung der Karbonatisierungstiefen von M1, M1_W (warmbehandelt), M2 und M3 nach 180 Tagen Lagerung unter Normklimabedingungen, Lagerung bei 2 % CO₂-Gehalt und Lagerung im Freien

Es lässt sich feststellen, dass bei allen drei untersuchten Mischungen erwartungsgemäß die Karbonatisierungstiefen der Proben am größten sind, welche bei künstlich auf 2 % CO₂-Gehalt erhöhten Bedingungen gelagert wurden. Des Weiteren ist die

Karbonatisierungstiefe bei der Witterung ausgesetzten Probekörpern geringer als die bei unter Normklimabedingungen gelagerten Prismen. Diese Beobachtungen decken sich mit den in *Hainer 2013* beschriebenen. Als Grund hierfür wird angegeben, dass eine regelmäßige Durchfeuchtung das Eindringen von CO₂ in den Beton verlangsamt.

Außerdem ist erkennbar, dass eine Wärmebehandlung die Karbonatisierung des Nanodur[®]-Betons nicht begünstigt.

Der verwendete Erhärtungsbeschleuniger wirkt sich hingegen negativ auf die Dauerhaftigkeit aus. Der Anstieg der Karbonatisierungstiefe ist proportional zur verwendeten Menge an Erhärtungsbeschleuniger.

Insgesamt ist jedoch als positiv festzuhalten, dass der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nanodur[®]-Beton eine sehr dichte Struktur aufweist, weshalb vom Gesichtspunkt der Karbonatisierung und der damit verbundenen Bewehrungsstahlkorrosion her nichts gegen eine Betondeckung von nur wenigen Millimetern spricht.

4.5.8 Chlorideindringwiderstand

4.5.8.1 Allgemeines zur chloridinduzierten Korrosion von hochfestem Beton

Nach *Nürnberger 1995* stellen erhöhte Chloridgehalte eine maßgebende Komponente der Korrosion von Bewehrungsstahl dar. Für den praktischen Anwendungsfall ist daher der Zutritt von Chloriden zu begrenzen. Um die Korrosionsgefährdung eines Bauteils beurteilen zu können ist es daher erforderlich, die Art und Geschwindigkeit des Eindringvorgangs von Chloriden in den Beton zu untersuchen.

Gleichzeitig transportiertes Wasser beeinflusst den Chloridionentransport in Beton maßgebend. Bei freier Bewitterung eines Bauteils findet das Eindringen von Chloridionen durch Absorption sowie Diffusion statt. Wird ein noch junger Beton mit chloridionenhaltigem Wasser beaufschlagt, bestimmt die Absorption durch die kapillare Wasseraufnahme den Transport des Salzes. Die Eindringgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Kapillarität des Betons. Außerdem ist sie umso höher, je trockener derselbe ist.

Die Beurteilung der Chlorideindringwiderstände der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Mischungen M1, M2 und M3 erfolgte in Anlehnung an *BAW 2012* und wird im Folgenden genauer beschrieben.

4.5.8.2 Versuchsprogramm

Nach *ZTV-W 2012* kann ein hinreichender Chlorideindringwiderstand gemäß *BAW 2012* nachgewiesen werden. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit für den verwendeten Nanodur[®]-Beton durchgeführt werden.

Von den Mischungen M1, M2 und M3 wurde jeweils eine Serie mit drei zylinderförmigen Probekörpern geprüft.

4.5.8.3 Herstellen der Versuchskörper, Versuchsaufbau und -durchführung

Es wurden von allen drei Mischungen jeweils sechs Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt, aus denen später die zylinderförmigen Probekörper gewonnen wurden.

Die Würfel wurden für 24 Stunden in der Schalung belassen, wobei die freien Oberseiten durch feuchte Lappen vor dem Austrocknen geschützt wurden. Anschließend wurden die Probekörper ausgeschalt und unmittelbar darauf in Leitungswasser mit einer Temperatur von 20 °C gelegt. Auf diese Weise wurden sie gelagert, bis die zylindrischen Probekörper aus ihnen entnommen wurden.

Die Probezylinder wurden durch Herausbohren aus den Würfeln, die zu diesem Zeitpunkt ein Alter von 55 Tagen hatten, senkrecht zur Herstellungsoberfläche gewonnen. Hierzu wurde ein Kernbohrgerät mit einer Bohrkronen mit einem Innendurchmesser von 100 mm verwendet. Anschließend wurde vom Bohrkern eine Schicht von 10 mm durch einen Sägeschnitt abgetrennt. Diese Schnittfläche wurde abgeschliffen, um eine ebene Oberfläche zu erlangen. Die so erhaltene Oberfläche stellt die Prüffläche dar. Durch einen weiteren Sägeschnitt parallel zu dieser Oberfläche wurden die Probekörper auf eine Höhe von 50 mm abgelängt. Anschließend wurden die prüfbereiten Zylinder vermessen. Alle Probekörper erfüllten die in *BAW 2012* an die Probekörpergeometrie gestellten Anforderungen, wonach zylinderförmige Probekörper einen Durchmesser von 100 ± 1 mm und eine Höhe von 50 ± 5 mm haben müssen.

Die Forderung, dass der Durchmesser des Probekörpers mindestens das Dreifache des Größtkorndurchmessers der Gesteinskörnungen betragen muss, wurde ebenfalls erfüllt.

Die auf diese Weise vorbereiteten Probekörper wurden bis zu ihrer Prüfung weiterhin in einem Wasserbad mit Leitungswasser mit einer Temperatur von 20 °C auf Rosten gelagert.

Die Prüfung der Probekörper in der Migrationszelle erfolgte 56 Tage nach der Herstellung. Die sechs Betonprobekörper jeder Versuchsserie wurden dazu in die Migrationszellen eingebaut, welche dann in den Migrationsapparat gestellt wurden. In jede Migrationszelle wurde oberhalb der Probekörper etwa 300 ml 0,2 normale Kaliumhydroxidlösung gegeben. Damit entstehende Gasblasen ungehindert aufsteigen konnten, wurden die Migrationszellen etwa 30° gegen die Horizontale geneigt. Der Versuchsbehälter wurde bis zum Meniskus der Kaliumhydroxidlösung in den Migrationszellen mit Chloridlösung (10 % NaCl in 0,2 normaler Kaliumhydroxidlösung) gefüllt. Anschließend wurden die Kathoden und die Anoden an einen Gleichrichter angeschlossen und die Prüfspannung von 30 V angelegt (vergl. Abb. 4.27).

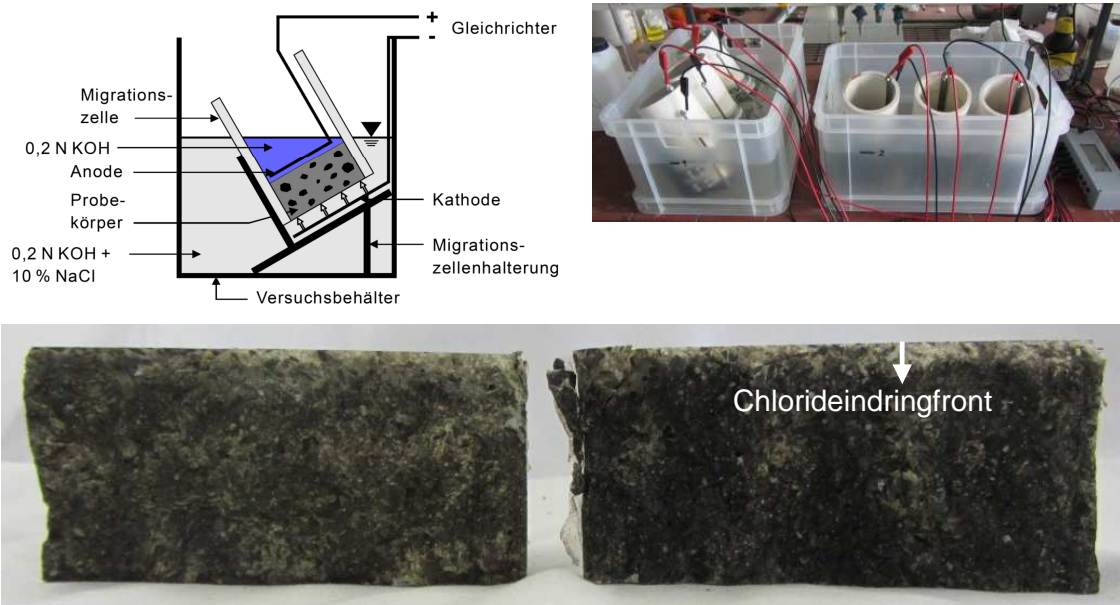


Abb. 4.27: links: Prinzipskizze des Migrationsapparates (Quelle: BAW 2012),
rechts: Versuchsaufbau an der TU Kaiserslautern,
unten: Prüfkörper einige Monate nach Versuchsende (links: Chromat, rechts: Fluor)

Zu Beginn und unmittelbar vor dem Ende der Spannungsbeaufschlagung wurden die Spannungen, die Stromstärken der Migrationszellen sowie die Temperaturen der beiden Prüflösungen gemessen.

Die Versuchsdauer ist abhängig von der Dichte der Probenmatrix und wurde in Abhängigkeit der gemessenen Anfangsstromstärke festgelegt.

Nach dem Abschluss der Messungen wurden die Migrationszellen ausgebaut und die Probekörper entnommen. Anschließend wurden die Betonzylinder parallel zur Richtung des Chlorideintrags gespalten. Auf die Bruchflächen der einen Hälfte von Probekörpern wurde eine Lösung aus Kaliumdichromat und Silbernitrat gesprüht, auf die der anderen Hälfte aus Fluorescein und Silbernitrat. Nach Lagerung der Probekörper von 24 Stunden zeichneten sich infolge der Indikatorbehandlung die Bereiche, in die Chloride eingedrungen waren, durch eine deutlich hellere Färbung ab. Die Eindringtiefen wurden an elf Stellen im Abstand von etwa 10 mm gemessen und gemittelt.

4.5.8.4 Versuchsergebnisse und -bewertung

Aus den auf diese Weise erhaltenen Versuchsdaten wurde der Migrationskoeffizient D_{cl} nach BAW 2012 berechnet und ist der nachfolgenden Tab. 4.26 zu entnehmen.

Tab. 4.26: Experimentell bestimmte Migrationskoeffizienten von M1, M2 und M3

Mischung	Probe	Versuchsdauer [h]	Eindringtiefe [mm]		C / F gemittelt [mm]	Mittelwert Eindringtiefe [mm]	Migrationskoeffizient D_{cl} [m^2/s]	Mittelwert Migrationskoeffizient D_{cl} [m^2/s]
			Chromat	Fluor				
M1	M1_1	88,7	7,1100	6,9773	7,044	6,435	$0,6477 \cdot 10^{-12}$	$0,6207 \cdot 10^{-12}$
	M1_2	90,5	5,3056	7,0409	6,173		$0,6104 \cdot 10^{-12}$	
	M1_3	90,5	5,9310	6,2456	6,088		$0,6039 \cdot 10^{-12}$	
M2	M2_1	70,0	7,4120	4,6727	6,042	6,240	$0,7610 \cdot 10^{-12}$	$0,8068 \cdot 10^{-12}$
	M2_2	70,0	7,4190	6,5178	6,968		$0,9264 \cdot 10^{-12}$	
	M2_3	70,0	5,0971	6,3190	5,708		$0,7331 \cdot 10^{-12}$	
M3	M3_1	67,9	5,7740	5,8280	5,801	5,480	$0,7509 \cdot 10^{-12}$	$0,7056 \cdot 10^{-12}$
	M3_2	67,9	5,8700	4,2930	5,082		$0,6499 \cdot 10^{-12}$	
	M3_3	67,9	6,9075	4,2050	5,556		$0,7160 \cdot 10^{-12}$	

Hinweis: Bei den in der Tabelle zu findenden Kurzschreibweisen „Chromat“ und „Fluor“ handelt es sich um die verwendeten Indikatoren.

Mit den ermittelten Migrationskoeffizienten kann mittels *BAW 2012* die Bewertung des Nanodur[®]-Betons hinsichtlich der Forderungen in Abhängigkeit der Expositionsklassen nach *DIN EN 206* vorgenommen werden.

Um die Forderungen einer entsprechenden Expositionsklasse einzuhalten, sind die in der nachfolgenden Tab. 4.27 dargestellten Mittelwerte und größten Einzelwerte der Migrationskoeffizienten zu berücksichtigen.

Tab. 4.27: Einzuhaltende Mittelwerte und größte zulässige Einzelwerte der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (in Anlehnung an *BAW 2012*)

Vorgegebene Expositionsklasse nach <i>DIN EN 206</i>	Migrationskoeffizient D_{cl} [m^2/s]	
	Mittelwert	Größter Einzelwert
XS 1, XD 1	$\leq 10 \cdot 10^{-12}$	$\leq 12 \cdot 10^{-12}$
XS 2, XD 2		
XS 3, XD 3	$\leq 5 \cdot 10^{-12}$	$\leq 7 \cdot 10^{-12}$

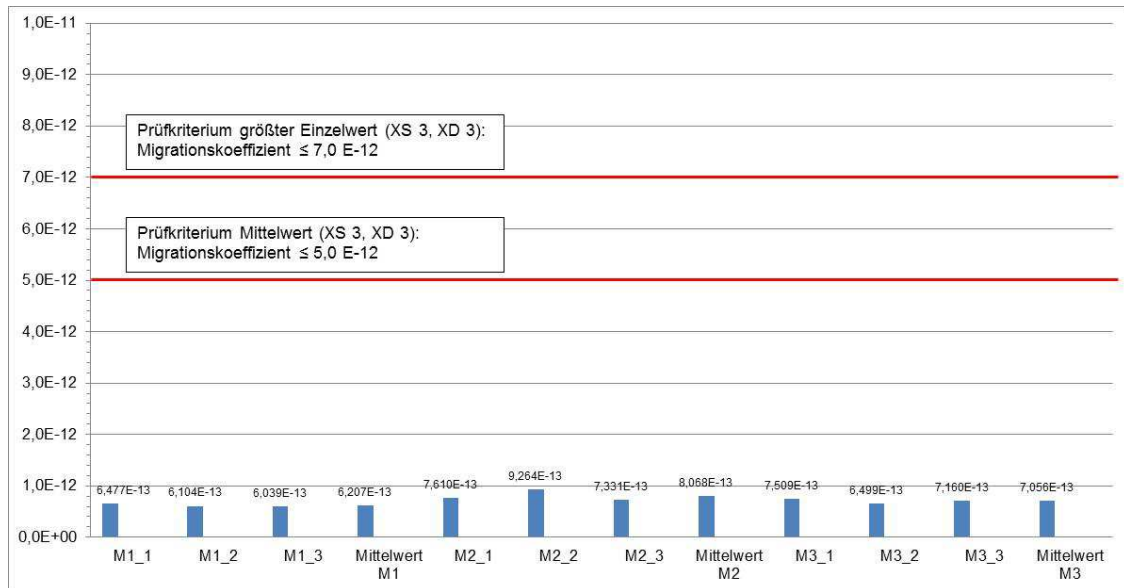


Abb. 4.28: Vergleich der einzuhaltenden Mittelwerte und größten zulässigen Einzelwerte der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse mit den Versuchsergebnissen

Es ist zu erkennen, dass sowohl alle in Tab. 4.26 aufgeführten Mittelwerte als auch die Einzelwerte die in Tab. 4.27 angegebenen maximal zulässigen Grenzwerte, die einzuhalten sind, um einer bestimmten Expositionsklasse zugewiesen werden zu können, weit unterschreiten. Die Mischungen M1, M2 und M3 erfüllen also an dieser Stelle die Forderungen, die gelten, um den Expositionsklassen XS 1, XS 2, XS 3, XD 1, XD 2 und XD 3 zugeordnet werden zu können (vergl. Abb. 4.28).

Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik mit ultrahochfesten Betonen finden sich beispielweise in *DAfStb 2008*.

4.6 Weitere Materialkennwerte von Nanodur[®]-Beton

In Tab. 4.28 sind die oben selbst ermittelten Materialkennwerte des verwendeten Nanodur[®]-Betons um Angaben aus *durcrete 2011 c* und *durcrete 2014* ergänzt.

Tab. 4.28: Weitere Materialkenngrößen Nanodur[®]-Beton (nach *durcrete 2011 c* und *durcrete 2014*)

Kenngröße		Wert
mittlere Wasseraufnahme	[Masse-%]	1 – 2
Wasseraufnahmekoeffizient $W_{w,24}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{h}}$	< 0,015
thermische Ausdehnung α_T	$\frac{\text{mm/mK}}{\text{K}^{-1}}$	$\approx 0,011$ $\approx 11 \cdot 10^{-6}$
Brandverhalten	Klasse	A1
Wärmeleitfähigkeit, Bemessungswert λ	W/mK	2,00
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , Richtwert	-	450/700

4.7 Fazit

Am Ende dieses Kapitels ist zusammenfassend zu sagen, dass die Mischung M2 für die großmaßstäbliche Serienfertigung im Praxisfall favorisiert wird. Der Grund ist, dass sie den Kompromiss zwischen Kosten, schneller Festigkeitsentwicklung und guter Verarbeitbarkeit am besten bildet.

5 Schwinden und Maßhaltigkeit bei der Herstellung

In diesem Kapitel wird zuerst auf das Schwinden von hochfestem Beton im Allgemeinen eingegangen. Danach wird eine zum Schwindverhalten von Nanodur[®]-Beton realisierte Versuchsserie beschrieben. Da diese keine ausreichenden Aussagen zum Schwindverhalten des verwendeten Betons liefern konnte, wird eine daran anschließende, ergänzende Versuchsreihe dargestellt. Im letzten Abschnitt wird eine an einem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Großdemonstrator durchgeführte Genauigkeitsanalyse geschildert.

5.1 Schwindverhalten des verwendeten Nanodur[®]-Betons

5.1.1 Allgemeines zum Schwinden von hochfestem Beton

Wie bereits in *Alonso 2002 a* und *Alonso 2002 b* zusammengefasst zeichnet sich hochfester Beton durch eine feste und dichte Zementsteinmatrix aus. Außerdem herrscht bei hochfestem Beton ein verbesserter Verbund in der Kontaktzone, die zwischen Matrix und Gesteinskörnung liegt. Um die erhöhte Festigkeit der Zementsteinmatrix zu erzielen, ist ein niedriger Wasserzementwert erforderlich (*DAfStb 1994* und *König 2000*). So sind ein hoher Zementgehalt und eine wasserarme Zusammensetzung der Matrix Grundvoraussetzung bei der Herstellung eines hochfesten Betons. Erst durch die Verwendung von leistungsfähigen Fließmitteln kann er in eine verarbeitungsfähige Konsistenz gebracht werden (*König 2000* und *Huber 1993*).

Auch der Erstarrungs- und Erhärtungsverlauf von hochfestem Beton unterscheidet sich von dem eines normalfesten Betons: Eine vollständige Hydratation des Zements wird bei einem so geringen Wasserzementwert nicht erreicht, was Auswirkungen auf alle von der Hydratation abhängigen Vorgänge hat: Die Volumenänderungen, die Entstehung von Hydratationswärme und die Festigkeitsentwicklung (*Aitcin 1997*).

Das Ausgangsvolumen des Zementleims verringert sich während der Hydratation infolge der chemischen Reaktion zwischen dem Anmachwasser und dem Zement. Dieses Schrumpfen bezeichnet man als chemisches Schwinden. Wird der hochfeste Beton konserviert, also ohne Wasserzufuhr von außen, gelagert, nimmt die relative Feuchte im Inneren aufgrund des chemischen Schwindens ab, es kommt zur Selbst-austrocknung. Voraussetzung hierfür ist ein Wasserzementwert $w/z \leq 0,50$, was bei dem betrachteten Beton der Fall ist (vergl. Abschnitt 3.5.2). Die Konsequenz ist das Entstehen eines Unterdrucks in den Poren, welche sich während des Hydratationsprozesses bilden. In den nun teilweise oder ganz ausgetrockneten Poren baut sich eine kapillare Randspannung auf, welche aus einer Änderung des äußeren Probekörpervolumens resultiert. Diese ist als autogenes Schwinden bekannt (*Justnes 1996* und *Persson 2000*). In der linearen Ausdehnung wird es als Schrumpfdehnung bezeichnet (*Müller 2002*). Zu der zum Schwinden erforderlichen Abnahme der Feuchte kommt es beim hochfesten Beton durch die innere Selbst-austrocknung. Diese ist mit der Festigkeitsentwicklung verknüpft und findet durch die Hydratation des Zements statt. Aus diesem Grund ist der Einfluss von umgebungsbedingten Austrocknungsvorgängen auf das Gesamtschwindmaß eines hochfesten Betons gering (*Baroghel-Bouny 2000* und *Persson 1999*).

Der Schwindverlauf ist zeitabhängig und wird immer durch einen Austrocknungsvorgang verursacht. Dies kann zum einen die Selbstaustrocknung – das sogenannte autogene Schwinden – sein, zum anderen die Austrocknung nach außen – das Trocknungsschwinden. Wird der Beton hygrysch konservierend gelagert, wird nur das autogene Schwinden erfasst, wohingegen beim Austrocknungsschwinden das Gesamtschwindmaß gemessen wird, in welchem der Teil des autogenen Schwindens enthalten ist. Schon unmittelbar nach dem Ansteifen des Betons treten messbare Volumenänderungen auf. Diese Tatsache macht es erforderlich, das autogene Schwinden vom Frischbetonalter an messtechnisch zu erfassen. Andernfalls wird im Versuch ein zu geringes Gesamtschwindmaß ermittelt, welches nicht auf das spätere Bauteilverhalten übertragbar ist (*Justnes 1996, Hammer 1999 und Barcelo 2001*).

5.1.2 Überprüfung der Formstabilität unter Schwindeinfluss an kreissegmentförmigen Probekörpern

Aufgrund über den Betonquerschnitt unterschiedlichen Schwindens kommt es zu einer Formveränderung eines schwindenden Bauteils. Eine solche wirkt sich negativ auf den Systemwirkungsgrad von Betonkollektoren aus. Zur Quantifizierung dieser Formänderung wurde im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern in Kooperation mit dem Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) der Hochschule Mainz eine Versuchsreihe zur Formstabilität des Nanodur[®]-Betons M1 durchgeführt (vergl. *Forman 2012 und Müller 2013 a*).

Mit einem Streifenlichtprojektor wurden 15 Betonkörper unterschiedlicher Stärke ab einem Alter von 24 Stunden auf Formveränderungen geprüft. Eingesetzt wurde der Scanner ATOS III der Firma GOM mit einem Messvolumen von 500 mm x 500 mm x 500 mm, der die Bestimmung von 3D-Punkten der Betonoberfläche mit einem Punktabstand von 0,25 mm bei einer Messgenauigkeit von etwa 0,05 mm ermöglicht.

Hierzu wurden Probekörper mit fünf unterschiedlichen Geometrien hergestellt: Drei mit konstanten Schalendicken von 10, 30 und 100 mm sowie zwei mit veränderlichen Schalendicken von 10 mm am linken und 30 mm beziehungsweise 100 mm am rechten Schalenrand. Die Breite betrug einheitlich 80 mm (vergl. Tab. 5.1 und Abb. 5.1). Von allen fünf Probekörpertypen wurden jeweils drei hergestellt und vermessen.

Tab. 5.1: Probekörpertypen

Typ	Anfangsstärke [mm]	Endstärke [mm]
1	10	10
2	10	30
3	10	100
4	30	30
5	100	100

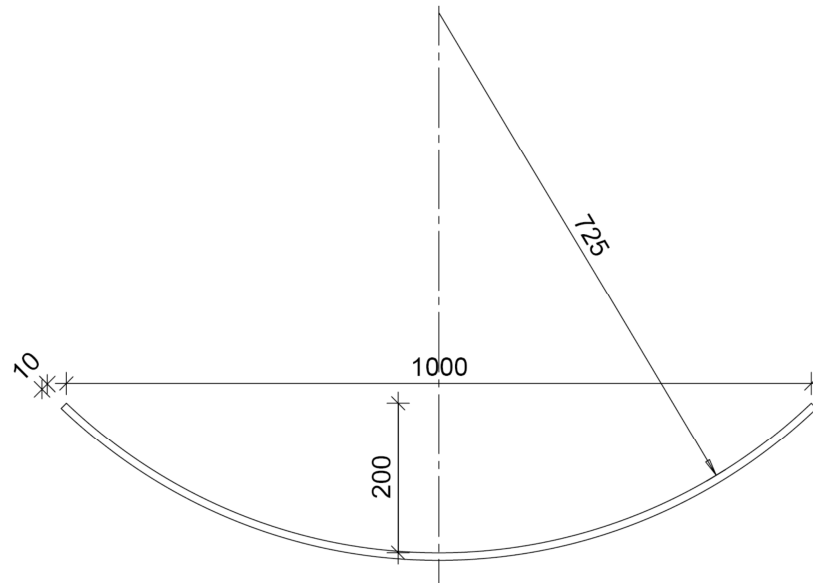


Abb. 5.1: Geometrie der Probekörper mit verschiedenen Schalendicken und einer Schalenbreite von 80 mm (Angaben in [mm])

Alle Probekörper wurden ab einem Betonalter von 24 Stunden an 28 aufeinanderfolgenden Tagen vermessen. Um ein möglichst unverfälschtes Ergebnis zu erhalten, wurden über den Zeitraum der Messung konstante Umgebungsbedingungen eingehalten. Dazu wurden die Betonteile während der kompletten Messperiode in einer Klimakammer bei Normklimabedingungen (20 °C / 65 % r. F.) aufbewahrt, in der auch sämtliche Messungen bei konstanten Bedingungen durchgeführt wurden (vergl. Abb. 5.2).

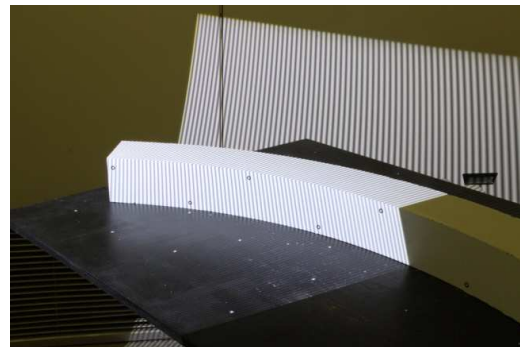


Abb. 5.2: Versuchsaufbau in einer Klimakammer der TU Kaiserslautern

Für die dreidimensionale Formerfassung der Betonprobekörper wurde ein Messverfahren der optischen Messtechnik eingesetzt, das eine schnelle und berührungslose Datenerfassung ermöglicht. Ein aktives optisches Verfahren, das Energie auf das zu vermessende Objekt sendet, wurde verwendet, da aktive Verfahren in der Regel effizienter und robuster arbeiten als passive Verfahren, die lediglich die vom Objekt ausgehende Strahlung interpretieren. Abb. 5.3 zeigt eine Übersicht über die gängigen Verfahren der dreidimensionalen Objekterfassung und illustriert die spezifische Charakteristik der aktiven 3D-Erfassung nach dem optischen Triangulationsverfahren, das die berührungslose hochgenaue Oberflächenvermessung ermöglicht.

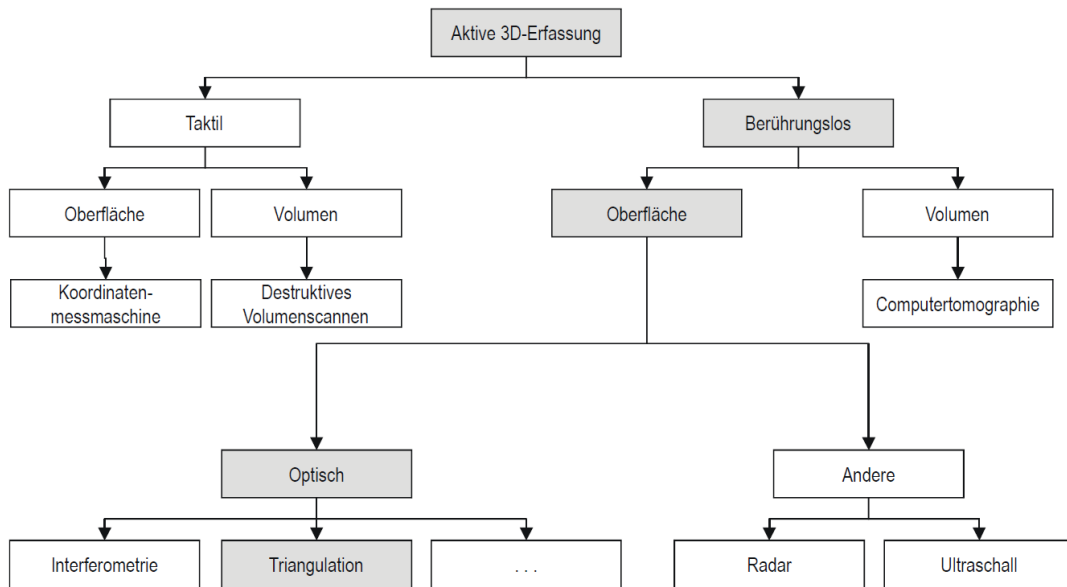


Abb. 5.3: Aktive Methoden zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen (Quelle: Gühring 2002)

Zur aktiven 3D-Triangulation kann beispielsweise ein Streifenprojektor eingesetzt werden, der sich als inverse Kamera betrachten lässt (vergl. Abb. 5.4). Wenn die äußeren und inneren Orientierungen von Kamera und Projektor bekannt sind, schneiden sich die durch den projizierten Streifen definierte Objektebene und die durch einen Bildpunkt der Kamera verlaufende Gerade in einem Objektpunkt P.

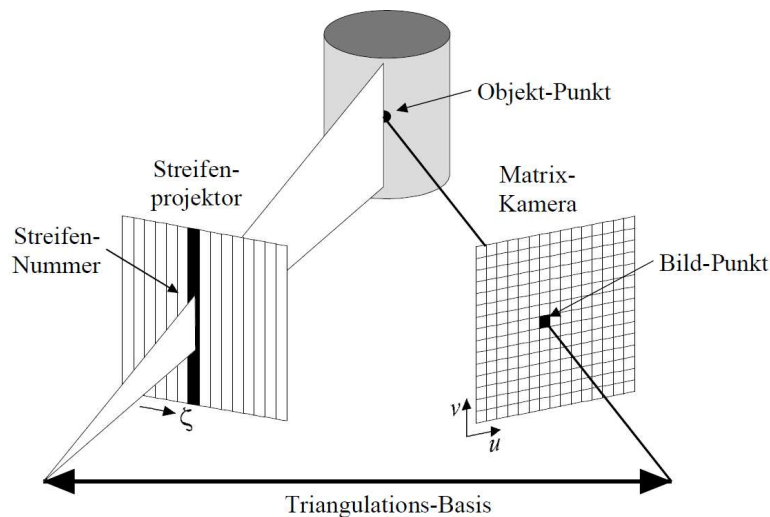


Abb. 5.4: Funktionsprinzip der aktiven Triangulation mit Streifenprojektor (Quelle: Wiora 2001)

Auf der Grundlage dieses Funktionsprinzips stellt die Firma GOM den optischen 3D-Scanner ATOS her, der in einer integrierten Einheit sowohl einen Streifenlichtprojektor als auch zwei hochauflösende Messkameras zur Detektion des projizierten Streifenmusters enthält (vergl. Abb. 5.5). Die hier realisierte Kombination von Projektor und Stereokamera führt zur Reduktion der Anzahl der benötigten Scans und verbessert gleichzeitig die Qualität der Ergebnisse.

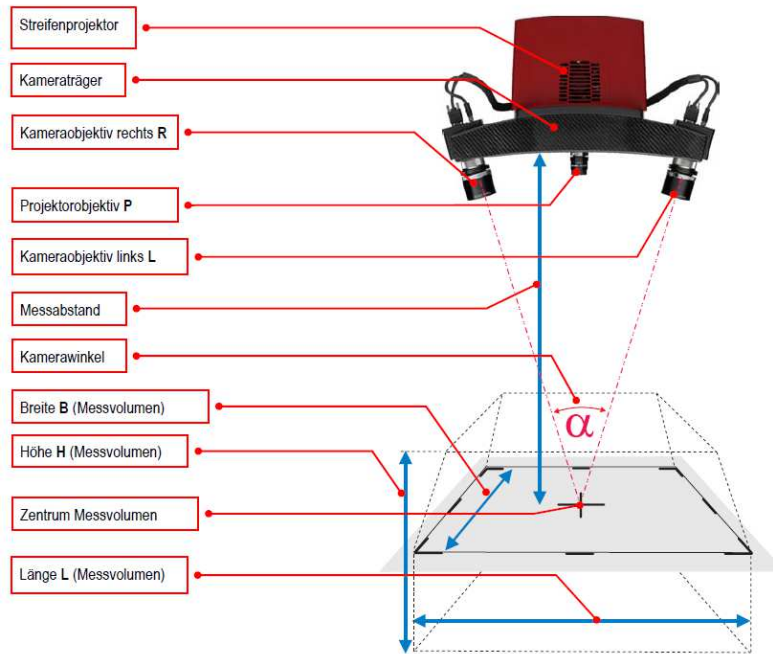


Abb. 5.5: Schematische Darstellung des GOM ATOS III Sensors (Quelle: GOM 2009)

Während der 28 Messtage entstanden so etwa 900 Messprojekte, die im Anschluss mit der Software ATOS ausgewertet wurden. Ergebnis waren vermaschte 3D-Oberflächenmodelle (vergl. Abb. 5.6).

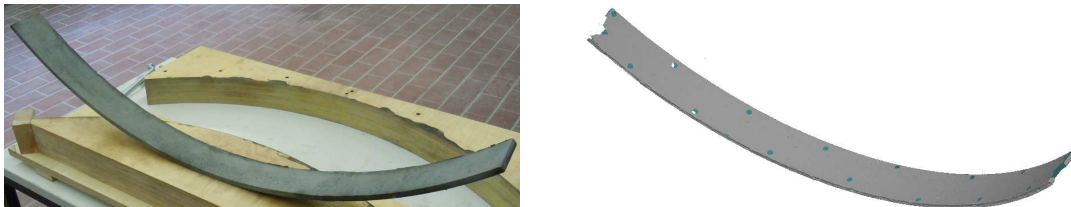


Abb. 5.6: Links: Probekörper, rechts: mittels der Laserscanmethode erstelltes 3D-Modell

Dabei wurden die Modelle des ersten Tages als Referenz gesetzt und mit den Modellen aus allen folgenden Tagen verglichen. Der räumliche Bezug zwischen den Ergebnissen aus den einzelnen Messtagen konnte über die Eckpunkte der Modelle hergestellt werden. Aus dem Vergleich der Oberflächen wurde dann jeweils die flächenhafte Formabweichung errechnet. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der Messpunkte und der hieraus berechneten Dreiecke des Oberflächenmodells für jeden Typ. Die 15 Testkörper wurden mit insgesamt etwa 15 Millionen 3D-Messpunkten beschrieben (vergl. Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Hoch aufgelöste Modellierung der Oberfläche der Betonkörper

Bezeichnung Betonkörper	Gemessene 3D-Punkte der Oberfläche (gerundet)	Modellierung der Oberfläche, Anzahl der Dreiecke (gerundet)
010-010	650.000	1.300.000
010-030	700.000	1.400.000
010-100	1.050.000	2.100.000
030-030	850.000	1.700.000
100-100	1.500.000	3.000.000

Neben den einzelnen 3D-Modellen und den Flächenvergleichsmodellen wurden Listen mit wichtigen Parametern wie Abweichungen in x-, y- und z-Richtung, minimale und maximale Abweichungen, Standardabweichung, Anzahl der gemessenen Punkte beziehungsweise der daraus abgeleiteten Dreiecke zur flächenhaften Beschreibung der Oberflächegeometrie, Fläche und Volumen für jedes Modell erzeugt. Diese Informationen bildeten die Grundlage für weitere Analysen und Auswertungen.

In Abb. 5.7 wird exemplarisch die Verformung eines Teils vom Typ 1 nach einer Messdauer von 3 Tagen gezeigt. Der Vergleich der beiden digitalen Oberflächenmodelle für die beiden Tage zeigt eine leichte Durchbiegung, die an den beiden Enden zum Hochbiegen um etwa 0,2 mm und in der Mitte zum „Durchhängen“ um etwa 0,1 mm führt.

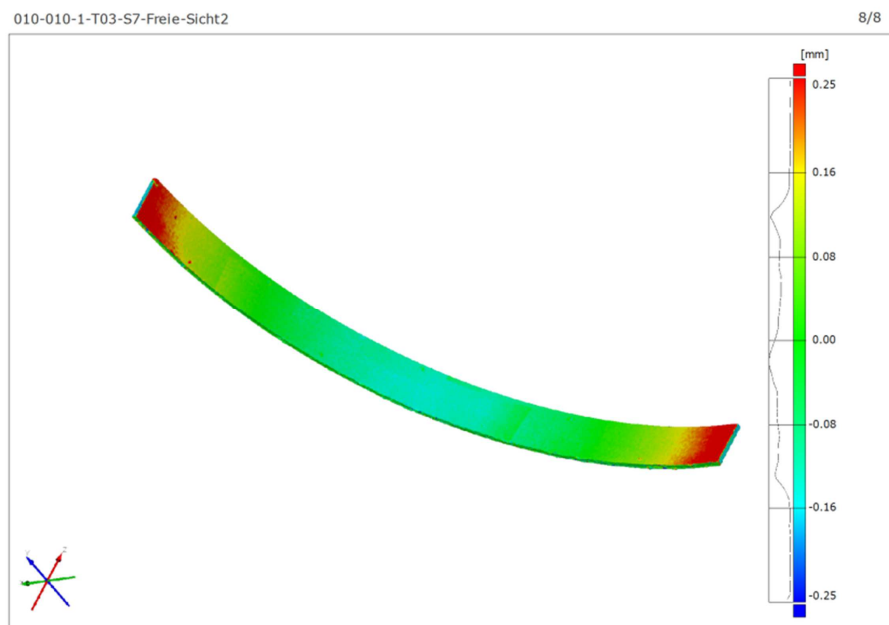
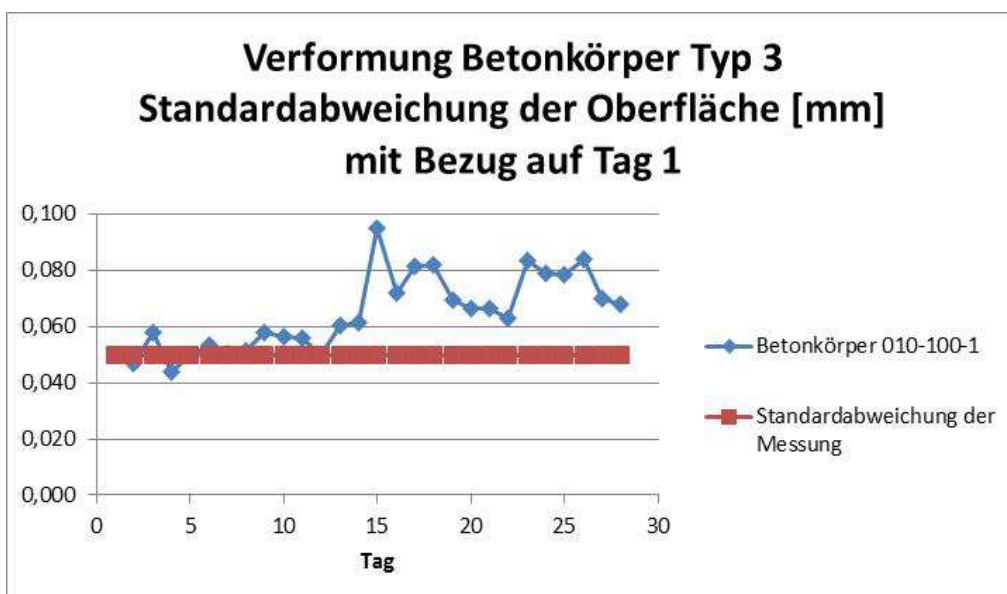
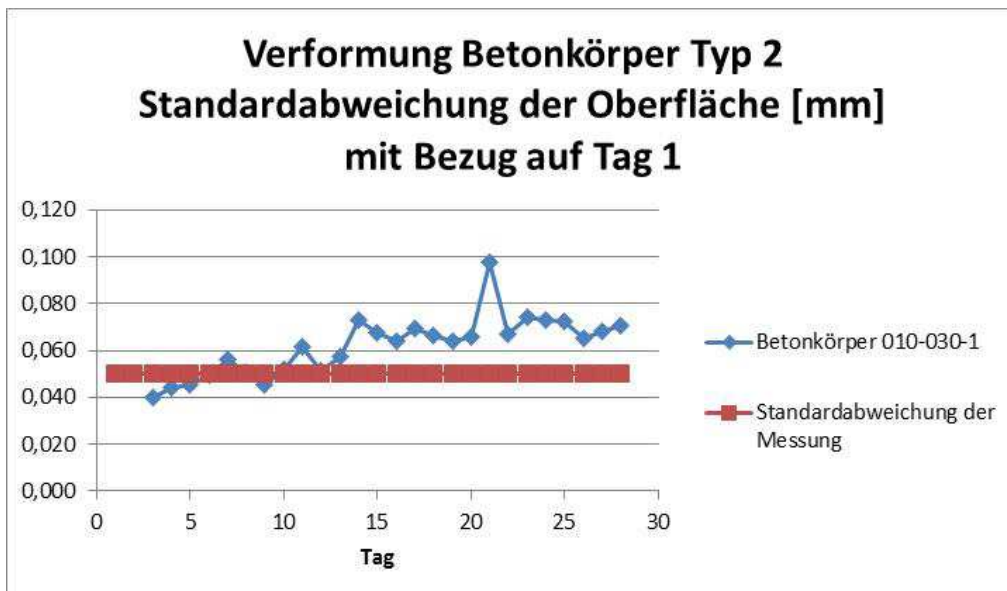
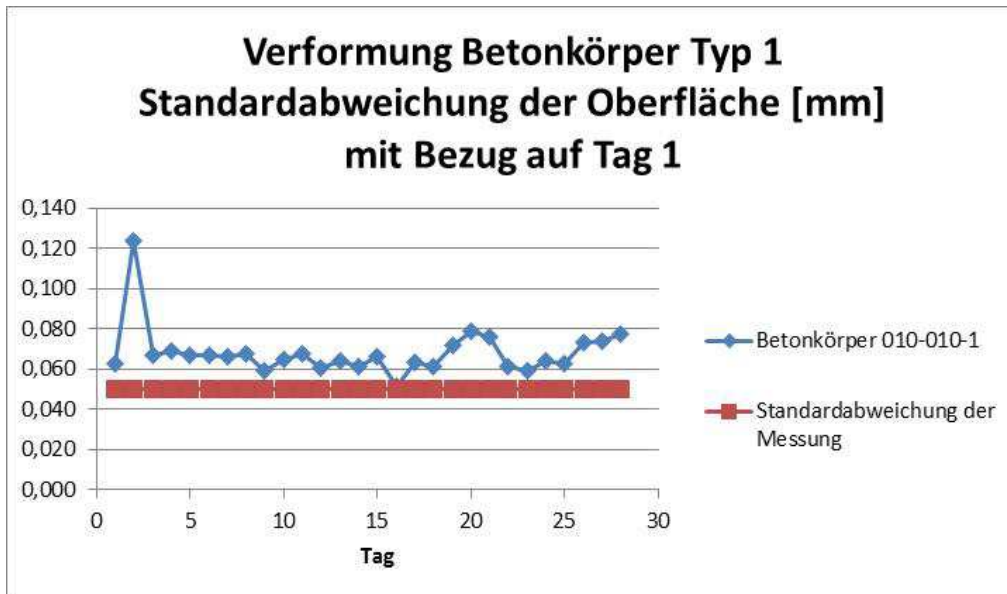


Abb. 5.7: Mittels der Laserscanmethode ermittelte Verformungsfigur nach 3 Tagen bezogen auf den Nullzeitpunkt, Typ 010-010

Um die Gesamtverformung zu dokumentieren, wurde aus den Differenzen der Oberflächenmodelle die Standardabweichung der Veränderung für jeden Messtag bezogen auf den ersten Tag der Messung bestimmt und grafisch dargestellt (vergl. Abb. 5.8).



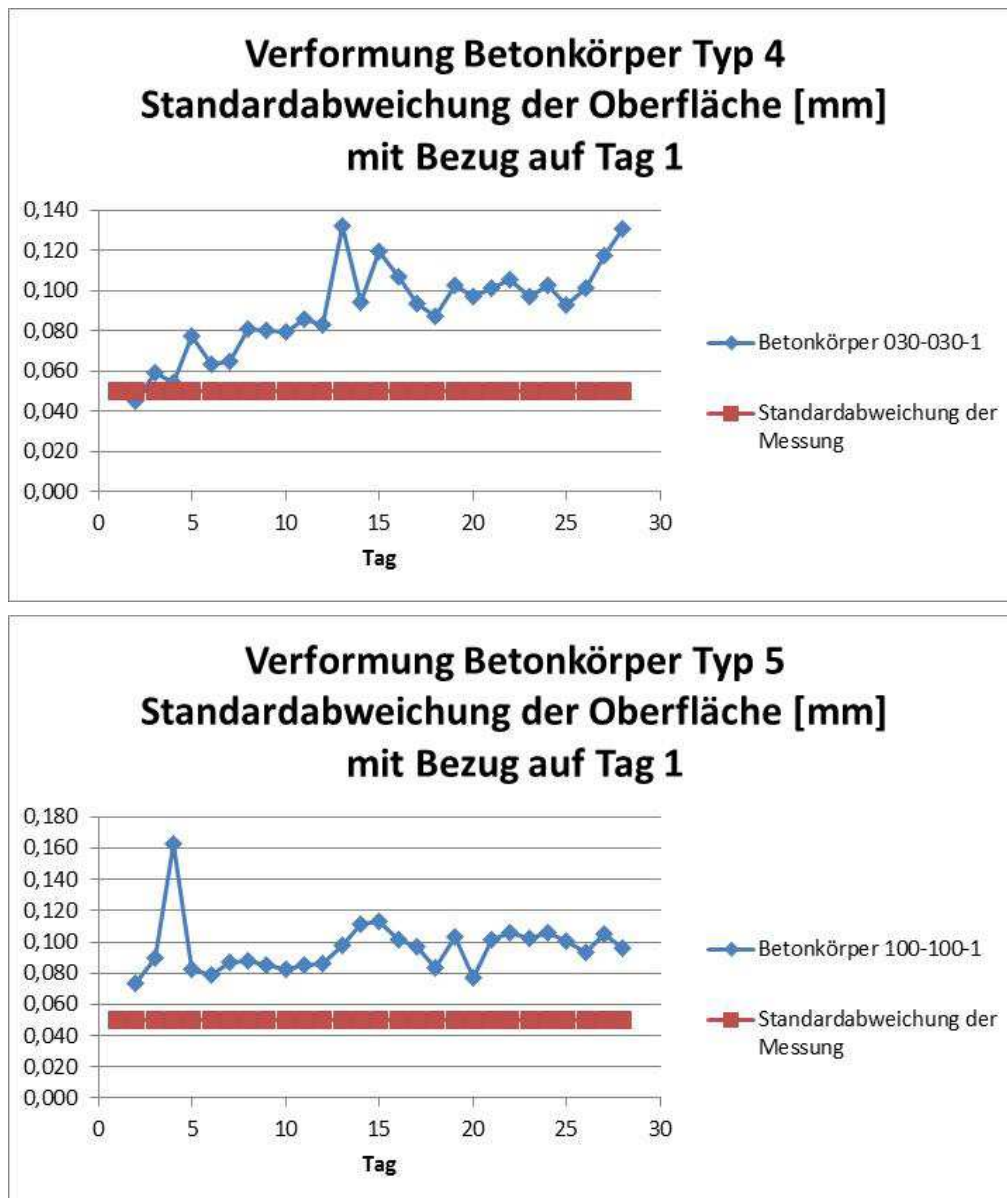


Abb. 5.8: Verformung der Betonkörper über den Messzeitraum von 28 Tagen

In Abb. 5.8 wird der zeitliche Verlauf der Verformung für jeweils einen Betonkörper der verschiedenen Typen (010-010, 010-030, 010-100, 030-030, 100-100) gezeigt. In allen Fällen lag die maximale Verformung der Betonkörper bezogen auf den Beginn des Messzeitraums im Bereich von höchstens etwa 0,1 mm. Die Werte bewegten sich ausnahmslos nur geringfügig über der Genauigkeit der Messung, die bei dem gewählten Messaufbau bei maximal etwa 0,05 mm liegt und somit die untere Schwelle der überhaupt messbaren Veränderungen bestimmte.

Als äußerst positives Fazit dieser Versuchsreihe lässt sich somit festhalten, dass die Verformungen der Probekörper infolge Schwindens im Zeitraum 24 Stunden nach Mischende bis zu einem Alter von 28 Tagen minimal waren.

Nachteil der hier beschriebenen Versuchsreihe ist, dass nur die vom Zeitpunkt des Ausschalens des Probekörpers an auftretenden Verformungen messtechnisch erfasst werden konnten.

Es wird vermutet, dass der Hauptanteil der Volumenverringering infolge Schwindens des verwendeten Nanodur[®]-Betons innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Ende des Mischvorgangs stattfindet.

Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt durch eine weitere Versuchsreihe untersucht, wie groß das Schwinden in den ersten 24 Stunden nach dem Ende des Mischvorgangs ist, welches durch die oben beschriebene Vorgehensweise nicht erfasst wurde.

Die Ergebnisse werden für die in Kapitel 7 durchzuführenden Finite-Elemente-Simulationen benötigt, mittels derer eine Aussage darüber getroffen werden soll, wie groß die Verformungen der Parabolrinne des Großdemonstrators infolge des Schwindens sind.

Zu diesem Zweck wurde das hochpräzise Schwindkegelverfahren angewendet, welches die Volumenverringering des Betons unmittelbar ab dem Zeitpunkt des Mischendes erfasst. Diese Versuchsreihe wird im Folgenden beschrieben.

5.1.3 Schwindkegelverfahren

Um das Schwindverhalten von dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Nanodur[®]-Beton adäquat untersuchen zu können, wurden in einer Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover im Labor derselben mit den dort vorhandenen technischen Geräten (*Weicken 2013*) die im Folgenden dargestellten Versuche mit Hilfe des Schwindkegelverfahrens (*Schleibinger 2013*) durchgeführt.

Geplant war die Verifizierung der mittels des Schwindkegelverfahrens gewonnenen Versuchsergebnisse mit Hilfe der Wellrohrmethode (vergl. Abb. 5.9) nach *Jensen 1995* oder *Germann Instruments 2010*. Aufgrund der zähen Konsistenz des hier zu untersuchenden Nanodur[®]-Betons stellte diese sich jedoch als nicht geeignet heraus und musste verworfen werden.

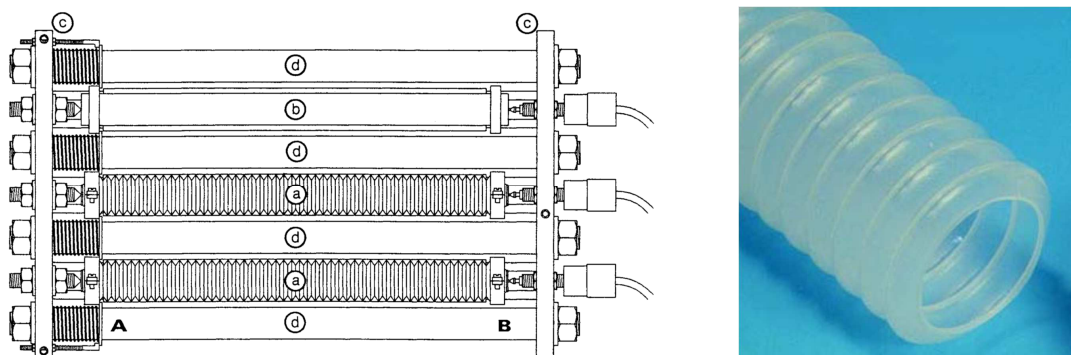


Abb. 5.9: Wellrohrmethode (Quellen: links: *Jensen 1995*, rechts: *Jensen 2001*)

Das Funktionsprinzip des verwendeten Schwindkegelverfahrens wird nun mit Hilfe von Abb. 5.10 erläutert (*Schleibinger 2013*): Der Nanodur[®]-Beton (2) wurde sofort nach Beenden des Mischvorgangs in den speziell geformten Prüfgutbehälter (1) eingefüllt. Dieser Behälter wurde anschließend unter der Lasereinheit (3) positioniert, die die Betonverformung mit Hilfe eines Reflektorplättchens (4) mikrometergenau misst. Mittels einer Justierschraube wurde anschließend der Entfernungswert auf

etwa 0 μm eingestellt und ein automatischer Nullabgleich am PC (5) durchgeführt. Die Betontemperatur wird von dem Gerät durch Positionieren eines Temperaturdrahtes im Volumenmittelpunkt des eingebauten Nanodur[®]-Betons aufgezeichnet. Auch die relative Luftfeuchte wird dokumentiert.

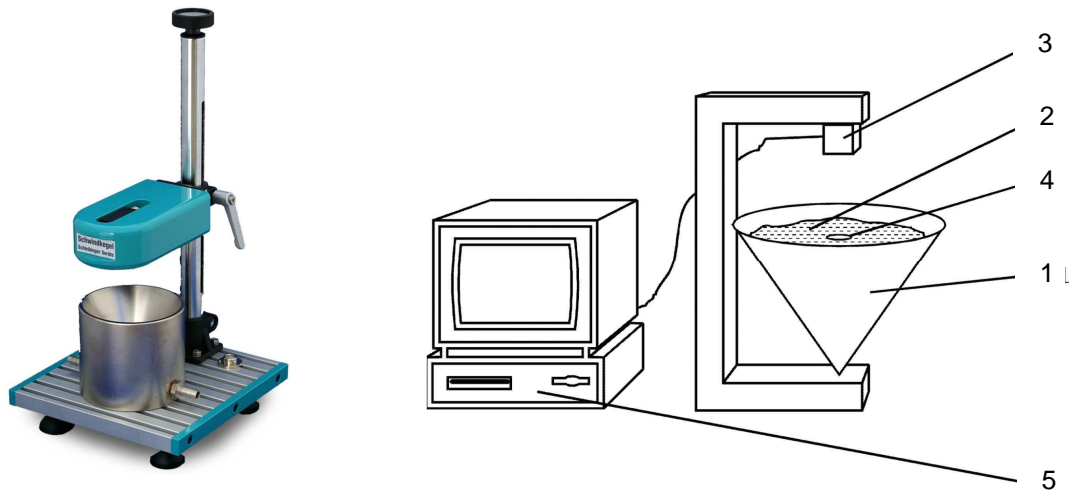


Abb. 5.10: Schematischer Versuchsaufbau Schwindkegelverfahren (Quelle: *Schleibinger 2013*)

Der Grund für die Verwendung einer Kegelform ist, dass sich unter der Annahme isotropen Schwindens der Radius und die Höhe eines Kegels um denselben Prozentsatz ändern. Dies wäre bei einem Zylinder nicht der Fall. Dort würde sich Material umlagern und die Höhenänderung des Betons im Kegel wäre nicht proportional zum Schwinden (*Schleibinger 2013*).

Die Verformungsmessungen wurden etwa 15 Minuten nach Wasserzugabe begonnen und über einen Zeitraum von maximal 84 Stunden durchgeführt. In der folgenden Abb. 5.11 sind die gemessenen Verformungen von jeweils zwei Proben der Mischungen M1 sowie jeweils einer Probe von M2 und M3 von Messbeginn an einander gegenüber gestellt. Bei M1 kamen diese nach rund 8 Stunden zum Stillstand. Es ist ein „typischer“ Schwindverlauf festzustellen, wie beispielsweise in *Weicken 2013* beschrieben: Zu Beginn ein starker Anstieg, welcher vom Setzen, Entlüften und chemischen Schwinden des Nanodur[®]-Betons resultiert. Es deutet sich ein kleines Plateau an, anschließend folgt eine erneute Verformungssteigerung infolge des autogenen Schwindens. Der Verlauf flacht dann schnell ab und nähert sich asymptotisch einem Endwert.

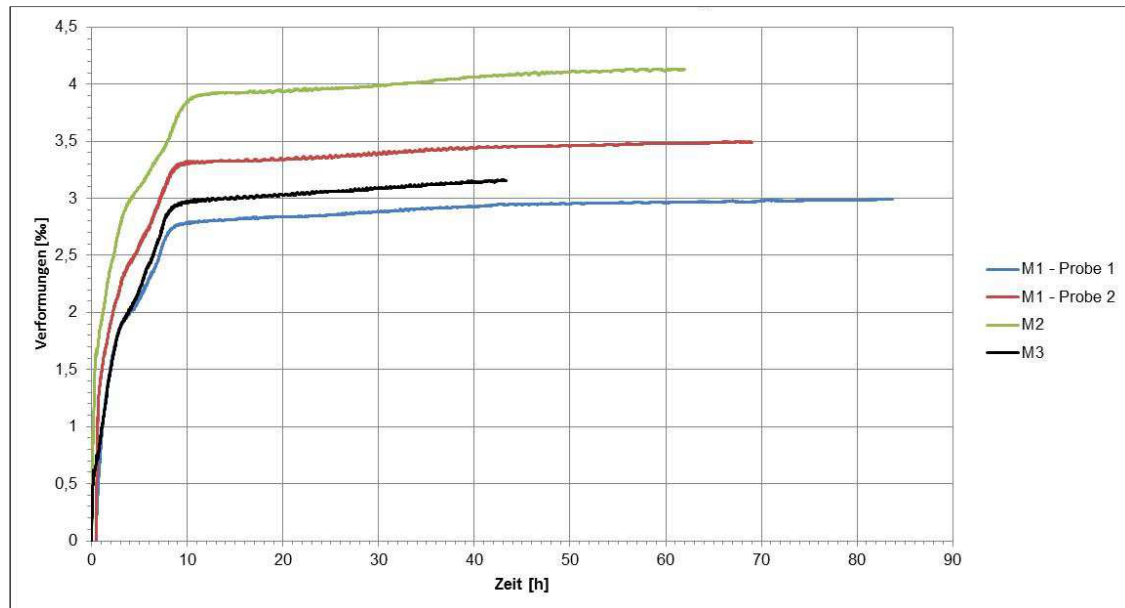


Abb. 5.11: Gemessene Verformungen der Mischungen M1, M2 und M3 infolge von Setzen, Entlüften und chemischem Schwinden

Es bestätigt sich, dass die zuerst durchgeführte Versuchsreihe mit den verschiedenen kreissegmentförmigen Probekörpern das Verformungsverhalten des untersuchten Nanodur[®]-Betons nicht in ausreichendem Maße abbildet, da der Hauptanteil der Verformungen infolge des Schwindens in den ersten zehn Stunden nach dem Ende des Mischvorgangs eintritt. Die oben beschriebene Versuchsreihe konnte jedoch erst die Schwindverformungen vom Zeitpunkt des Ausschalens der Probekörper an erfassen.

Die Betonfestigkeiten von Nanodur[®]-Beton können durch Anwendung einer Wärmebehandlung nicht signifikant gesteigert werden (vergl. Kapitel 4). In Bezug auf das Kriechen und Schwinden hingegen sei eine solche Form der Nachbehandlung durchaus effektiv. Anhand der oben dargestellten Messergebnisse ist erkennbar, dass etwa 95 % der Volumenreduktion, verursacht durch Setzen, Entlüften und chemisches Schwinden, in den ersten zehn Stunden nach Beendigung des Mischvorgangs eintritt. Während dieser Zeit befindet sich das Bauteil in der Schalung und auch durch Einsatz eines Erhärtungsbeschleunigers konnten die Betonfestigkeiten nicht in dem Maße gesteigert werden, dass ein Ausschalen nach einer deutlich kürzeren Zeitspanne machbar erscheint (vergl. Kapitel 4.5.4). Zu dem Zeitpunkt, von dem an ein Ausschalen des Bauteils und eine anschließende Wärmebehandlung also möglich sind, sind die Verformungen des Bauteils infolge Schwindens bereits fast vollständig abgeschlossen. Der Anteil der dann noch verhinderbaren Verformungen erscheint bei diesem Anwendungsfall vernachlässigbar und kann den Aufwand einer solchen Wärmebehandlung nicht rechtfertigen. Um die Verformungen infolge Schwindens wirksam zu reduzieren, erscheint es aus diesem Grund unabdingbar, das Bauteil bereits in der Schalung einem Wärmebehandlungsregime zu unterziehen. Eine erforderliche steife Stahlschalung stellt eine Schwindbehinderung dar. Dies führt zu Zwängungen im Bauteil und zu einer Druckvorspannung der Bewehrung, die zu vermeiden sind. Weiteres diesbezüglich ist Kapitel 7.5 zu entnehmen.

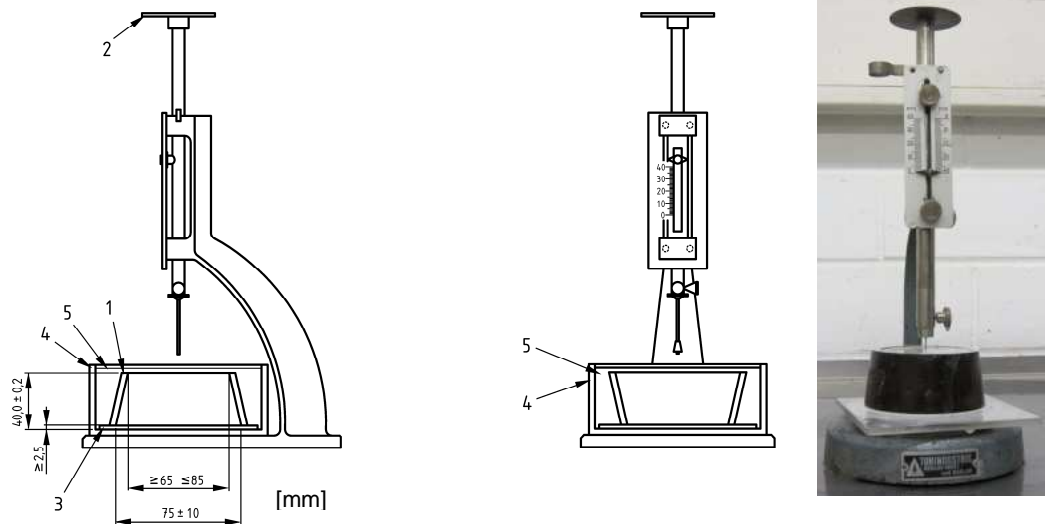
Bezüglich des Kriechens wurden Untersuchungen durch die Projektpartner der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Das Ergebnis war, dass Verformungen aus Kriecheinflüssen einen geringen Einfluss auf den Interceptfaktor haben (*Müller 2013 b*). Es besteht kein Grund zur Annahme, dass sich der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nanodur[®]-Beton in seinem Kriechverhalten unterscheidet.

Würde man das Endschwindmaß des untersuchten Betons im Bauteil aus Abb. 5.11 ableiten, so würde man nach *Weicken 2013* die autogenen Schwindverformungen deutlich überschätzen. Relevant sind dort nur die spannungsinduzierenden Verformungen. Das Auftreten derselben setzt voraus, dass der Beton bereits soweit erstarrt ist, dass er in Lage ist, Spannungen zu übertragen. Dieser Zeitpunkt wird auch als t_0 -Zeit bezeichnet und wird im Folgenden ermittelt.

Nach *Weiss 2003* existieren verschiedene Verfahren zur Bestimmung dieser t_0 -Zeit (*Weicken 2013*). Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*) angewendet.

Der im Folgenden beschriebene Versuch erfolgte nach *DIN EN 196-3* und *DIN EN 480-2* und dient dem Vergleich der Mischungen M1, M2 und M3 hinsichtlich ihres Erstarrungsverhaltens durch die Bestimmung ihrer jeweiligen t_0 -Zeit.

Verwendet wurde dazu ein Nadelgerät nach Vicat (vergl. Abb. 5.12). Es besteht aus einem beweglichen Tauchstab mit einer Masse von 300 g. Unter dessen Spitze wurde der Vicat-Ring, der eine Tiefe von 40 mm und einen inneren Durchmesser von 75 mm hat, mit dem darin enthaltenen zu prüfenden Beton positioniert und die Nadeleindringtiefe gemessen. Verwendet wurde ein Ring mit konischer Form auf einer ebenen Glasplatte. Die Versuche wurden mit einem Messintervall von 10 Minuten durchgeführt.



Legende

- 1 Vicat-Ring
- 2 Platte für Zusatzmasse
- 3 Grundplatte
- 4 Prüfbehälter
- 5 Wasser

Abb. 5.12: links: Versuchsaufbau mit aufrecht stehendem Vicat-Ring zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns (Quelle: *DIN EN 196-3*), Mitte: Versuchsaufbau mit umgekehrtem Vicat-Ring zur Bestimmung des Erstarrungsendes (Quelle: *DIN EN 196-3*), rechts: Versuchsaufbau an der TU Kaiserslautern

Die Zeitspanne zwischen Nullzeit und dem Zeitpunkt, zu dem die Nadel 34 ± 3 mm in den Beton eindringt, gilt als Erstarrungsbeginn. Als Nullzeit ist der Zeitpunkt definiert, an dem alle Betonausgangsstoffe im Mischer sind und der Mischvorgang gestartet wird. Das Erstarrungsende ist die Zeitspanne zwischen Nullzeit und dem Zeitpunkt, zu dem die Stahlnadel nur noch 0,5 mm in den erhärteten Beton eindringt.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserien dargestellt.

M1

In der nachfolgenden Tab. 5.3 sind der Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende von M1 dargestellt. Die Frischbetontemperatur betrug $27,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tab. 5.3: Erstarrungszeit von M1 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*)

	Erstarrungsbeginn [min]			Mittelwert [min]
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	
Erstarrungsbeginn	49	36	42	42
Erstarrungsende (t_0 -Zeit)	314	286	247	282

Der Erstarrungsbeginn bei M1 wurde im Mittel nach 42 Minuten, das Erstarrungsende im Mittel nach 282 Minuten festgestellt.

M2

Tab. 5.4 beinhaltet den Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende von M2. Die Frischbetontemperatur betrug 26,3 °C.

Tab. 5.4: Erstarrungszeit von M2 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*)

	Erstarrungsbeginn [min]			Mittelwert [min]
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	
Erstarrungsbeginn	36	22	48	35
Erstarrungsende (t_0 -Zeit)	106	206	236	183

Bei M2 wurde der Erstarrungsbeginn im Mittel nach 35 Minuten, das Erstarrungsende im Mittel nach 183 Minuten gemessen.

M3

In Tab. 5.5 sind der Erstarrungsbeginn sowie das Erstarrungsende von M3 aufgeführt. Die Frischbetontemperatur betrug 25,7 °C.

Tab. 5.5: Erstarrungszeit von M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*)

	Erstarrungsbeginn [min]			Mittelwert [min]
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	
Erstarrungsbeginn	11	11	11	11
Erstarrungsende (t_0 -Zeit)	143	203	203	183

Der Erstarrungsbeginn bei M3 wurde im Mittel nach 11 Minuten, das Erstarrungsende im Mittel nach 183 Minuten festgestellt.

Gegenüberstellung der Erstarrungszeiten von M1, M2 und M3

Nachdem für alle drei im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mischungen M1, M2 und M3 die Frischbetontemperaturen gemessen und die Erstarrungszeiten experimentell ermittelt wurden, werden diese in Tab. 5.6, Tab. 5.7 und Abb. 5.13 einander gegenüber gestellt.

Tab. 5.6: Gegenüberstellung der Frischbetontemperaturen von M1, M2 und M3

Frischbetontemperatur	Frischbetontemperatur [°C]		
	M1	M2	M3
	27,4	26,3	25,7

Bei der Frischbetontemperatur lässt sich kein nennenswerter Unterschied zwischen den Mischungen M1, M2 und M3 feststellen. Diese wird vom Erhärtungsbeschleuniger somit nicht wesentlich beeinflusst. Es ist lediglich die Tendenz zu erkennen, dass

die Frischbetontemperatur mit steigendem Erhärtungsbeschleunigergehalt abnimmt. Diese Beobachtung passt zu der in Kapitel 4.5.3 gemachten, wo der Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme der drei Mischungen M1, M2 und M3 verglichen wird.

Tab. 5.7: Gegenüberstellung der Erstarrungszeiten von M1, M2 und M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*)

	Erstarrungszeit [min]		
	M1	M2	M3
Erstarrungsbeginn	42	35	11
Erstarrungsende (t_0 -Zeit)	282	183	183

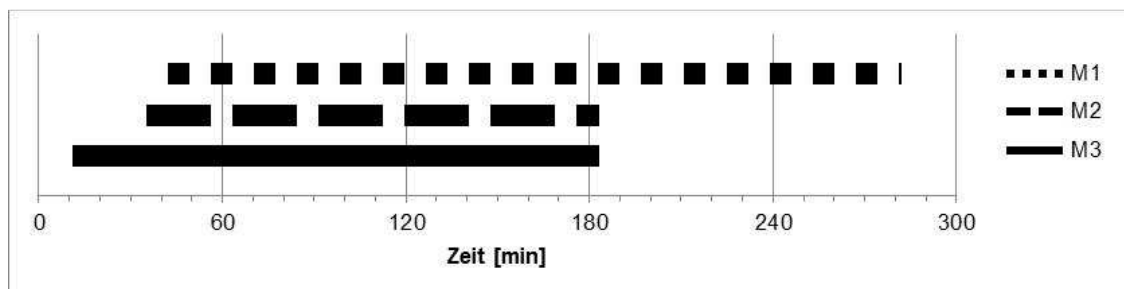


Abb. 5.13: Gegenüberstellung der Erstarrungszeiten von M1, M2 und M3 ermittelt mit dem Verfahren nach Vicat (*DIN EN 196-3*)

Es ist erwartungsgemäß zu erkennen, dass der Erstarrungsbeginn in der Tendenz umso früher eintritt, je größer die verwendete Erhärtungsbeschleunigermenge ist. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass sich die Erstarrungszeit, also die Zeitspanne zwischen Beginn und Ende der Erstarrung, durch die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers nicht verkürzt.

Bestimmt wurde die jeweilige t_0 -Zeit zur Ableitung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen aus den gemessenen Gesamtschwindverformungen. Hierzu wurden die in Abb. 5.11 dargestellten Verläufe der Gesamtschwindverformungen, wie in *Weicken 2013* beschrieben, ab dem Zeitpunkt t_0 abgeschnitten und auf null gesetzt. Der Grund hierfür ist, dass erst ab diesem Zeitpunkt alle von da an auftretenden Verformungen zu Eigenspannungen innerhalb des Betongefüges führen. Werden diese behindert, so können sie zu Rissen führen. In Abb. 5.14 sind die autogenen Schwindverformungen der drei im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mischungen dargestellt.

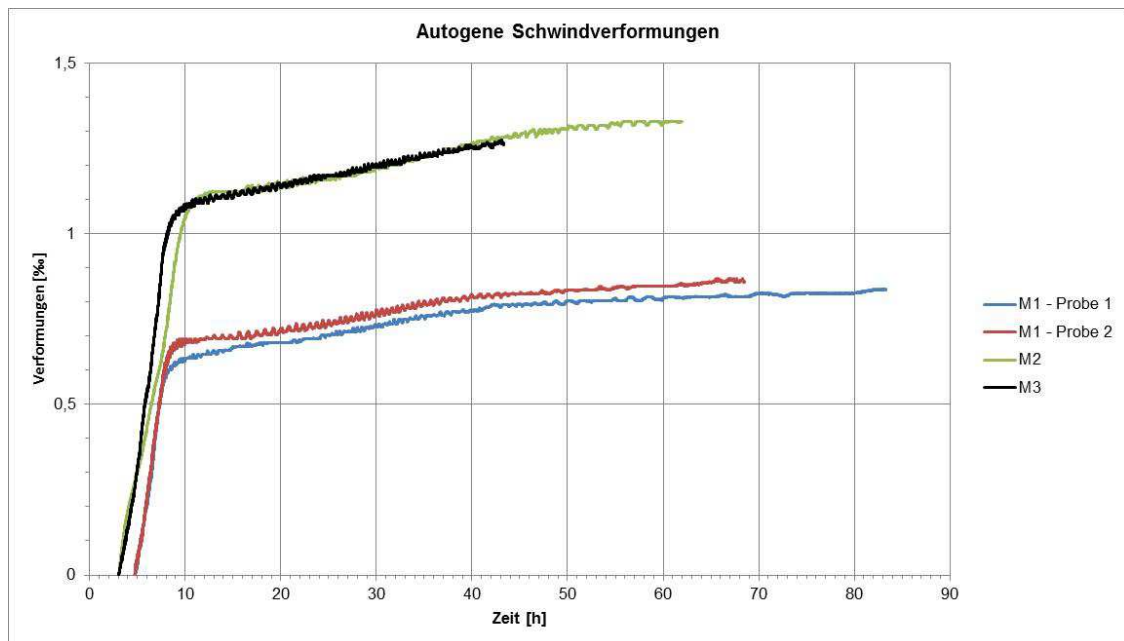


Abb. 5.14: Autogene Schwindverformungen nach jeweils ermittelter t_0 -Zeit der Mischungen M1, M2 und M3

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die autogenen Schwindverformungen von M1 bei etwa 0,8 ‰ liegen.

Es ist außerdem erkennbar, dass das Schwindmaß bei Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers auf etwa 1,3 ‰ ansteigt. Der Anstieg ist jedoch nicht proportional zur eingesetzten Menge an Erhärtungsbeschleuniger. So ist das Schwindmaß für M2 und M3 gleich groß, obwohl bei M3 die doppelte Menge an Erhärtungsbeschleuniger eingesetzt wurde.

5.2 Vermessungen und Genauigkeitsanalyse des Großdemonstrators

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde die Parabolrinne aus hochfestem Beton des an der TU Kaiserslautern hergestellten Großdemonstrators (vergl. Kapitel 8) nach einer Standzeit von 15 Monaten vermessen. Ziel war es, die Rinne hinsichtlich ihrer erzielten Genauigkeit nach einer längeren Standzeit unter Witterungseinflüssen beurteilen zu können. Damit einhergehend sollte der Großdemonstrator hinsichtlich seiner geometrischen Formgenauigkeit, welche Abweichungen der Spiegelform von der Idealparabel beschreibt und durch den sogenannten Interceptfaktor charakterisiert wird, beurteilt und mit bereits bestehenden Systemen verglichen werden können.

Zu diesem Zweck wurde die Parabolrinne mittels zwei voneinander unabhängigen Messsystemen untersucht: Mit dem Verfahren der Deflektometrie und zur Verifikation und Ergänzung der dadurch erhaltenen Ergebnisse mit dem Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie. In *Ulmer 2009* werden beim Anwendungsfall EuroTrough ebenfalls beide Messverfahren zur Verifikation eingesetzt.

Wie in *Ulmer 2009* bereits zusammengefasst wurden in den letzten dreißig Jahren eine Reihe von Messsystemen für das Testen von Prototypen entwickelt. In den späten 1970ern stellte Sandia Laboratories ein laserbasiertes System vor (*Hansche 1978*). Dieses System scannt eine reflektierende Oberfläche mit einem Laser-

strahl ab, misst die reflektierten Strahlen auf einem Zielobjekt und berechnet die resultierenden Flächennormalen. Einige Jahre später entwickelte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein computergesteuertes Messsystem, welches auf demselben Messprinzip basiert (*Köhne 1985 a*). Sandia verbesserte das von ihnen entwickelte System mit einer automatischen Erkennung des reflektierten Strahls durch eine Videokamera und nannte es Video Scanning Hartmann Optischer Tester (VSHOT) (*Jones 1997*). All diese Systeme messen die Steigungen der Parabolrinnenoberfläche mit ausreichend großer Genauigkeit. Allerdings ist der Aufbau dieser Systeme sehr zeitaufwändig und die räumliche Auflösung der Messungen ist aufgrund des zum Scannen von großen Oberflächen mit hoher Auflösung benötigten hohen Zeitaufwands begrenzt. Feldmessungen werden durch die Kollektorstellung beschränkt, welcher mehr oder weniger horizontal ausgerichtet sein muss.

Diese Einschränkung entfällt beim Messverfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie, welches bei der Vermessung von dreidimensionalen Objekten weit verbreitet ist und auch bei der Vermessung des Großdemonstrators an der TU Kaiserslautern eingesetzt wurde.

Das Messverfahren der Nahbereichsphotogrammetrie hat nach *Ulmer 2009* jedoch eine Reihe von Nachteilen: Die zu vermessende Oberfläche muss mit einer ausreichend großen Zahl von Messpunkten vorbereitet werden (vergl. Abb. 5.17). Das Applizieren und Erfassen derselben ist äußerst zeitaufwändig und daher nicht geeignet für die hochauflösende Vermessung von großen Flächen. Des Weiteren werden die Neigungen der Reflektoroberfläche aus Punktkoordinaten im Raum berechnet. Hochauflösende Vermessungen implizieren kleine Abstände zwischen den Messpunkten und winzige aber unvermeidbare Messfehler können zu signifikanten Fehlern bei der Ermittlung der Neigung führen (*Pottler 2005*).

Diese Nachteile können durch die an der TU Kaiserslautern gesammelten eigenen Erfahrungen bestätigt werden.

Die Nachteile führten zur Entwicklung einer neuen Messmethode durch das DLR speziell für die Vermessung von Parabolrinnen, mittels derer die Oberflächenneigungen von großen Oberflächen direkt, hochauflösend und mit geringer Aufbau- und Messzeit ermittelt werden können: „Trough Absorber Reflection Measurement System (TARMES)“.

Zuerst wurde der Großdemonstrator mit diesem neuartigen Messverfahren untersucht.

5.2.1 TARMES

Wie in *Ulmer 2009* bereits zusammengefasst, wurde mit der TARMES-Methode ein neues, aufgrund einer kurzen Aufbau- und Messdauer zeitsparendes und dennoch hochpräzises Messverfahren entwickelt, um auch große Reflektorflächen von Parabolrinnen optisch vermessen zu können.

Wenn das menschliche Auge eine spiegelnde Oberfläche und die Reflexion eines regelmäßigen Musters darauf beobachtet, ist es ohne große Anstrengung in der Lage, Störungen des reflektierten Musters zu entdecken. Diese Störungen werden durch Unregelmäßigkeiten in der Neigung der reflektierenden Fläche verursacht, welche auf stumpfen Oberflächen häufig nicht wahrnehmbar wären. Diesen Verstär-

kungseffekt macht man sich in der Qualitätskontrolle von reflektierenden Flächen wie Autokarosserien, Windschutzscheiben und verchromten Metallteilen zu Nutze (Grotepaß 2001). Das sogenannte deflektometrische Messsystem mit einem definierten geometrischen Aufbau, einem Bildschirm mit einem regelmäßigen Muster und einer Digitalkamera kann benutzt werden, um Beulen und andere Defekte der spiegelnden Oberfläche zu detektieren (Kammel 2003). Auf diesem Prinzip basierend wurde eine Messmethode für den speziellen Anwendungsfall von Parabolrinnenkollektoren entwickelt und evaluiert.

Das Messprinzip wird nachfolgend erläutert. Parabolrinnen konzentrieren das einfallende parallele Sonnenlicht auf ein relativ kleines Absorberrohr, welches in der Fokallinie positioniert ist. Strahlen, die vom Absorber kommen und im Kollektor reflektiert werden, nehmen denselben Weg, allerdings in der entgegengesetzten Richtung. Ein entfernt stehender Beobachter, der den Konzentrator betrachtet, sieht das reflektierte Abbild des Absorberrohrs, welches durch die optischen Eigenschaften des Reflektors vergrößert ist. Die Position dieser Reflexion im Konzentrator sowie die Form ihrer äußeren Kanten reagieren sehr sensibel auf Variationen in den Oberflächenneigungen. Diese Anordnung, bekannt als „Distant Observer Technique“ (Wood 1981), kann benutzt werden, um die Normalenvektoren und damit die Neigungen des Konzentrators mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Das Verfahren wird auch als TARMES bezeichnet.

Zur Anwendung dieser Methode an der TU Kaiserslautern wurde eine Digitalkamera auf der optischen Achse in einigen Metern Entfernung zur Parabolrinne positioniert. Wie bereits erwähnt, erscheint in dieser Position die Reflexion des Absorberrohrs stark vergrößert im Konzentrator. Dies gewährleistet eine hohe Sensibilität für kleine Winkelabweichungen in der Spiegeloberfläche. Bevor die Messung gestartet wurde, wurde der Kollektor gedreht, bis die Reflexion gänzlich verschwand. Dann wurde eine Bilderserie von der Reflexion des Absorberrohrs aufgenommen, während die Rinne solange gedreht wurde, bis die Reflexion wieder auf der anderen Seite verschwand. Die Vermessung des Kollektors an der TU Kaiserslautern wurde auf zwei Positionen beschränkt: In horizontaler Position gen Osten und nahe der Kollektorstellung bei Sonnenstand im Zenit. Dabei wurden die zugehörigen Drehwinkel mittels eines Inklinometers aufgezeichnet. Der Winkelbereich für das Drehen des Kollektors betrug für eine Messung dabei etwa 5° . Zur besseren Erfassung von der Auswertungssoftware wurde das Glashüllrohr mit rotem Papier umwickelt (vergl. Abb. 5.15).



Abb. 5.15: Messverfahren 1 – Deflektometrie (TARMES)

Die erzeugten Bilder wurden mittels der in Matlab implementierten TARMES-Auswertesoftware verarbeitet. Der speziell entwickelte Algorithmus korrigiert zuerst Linsenverzerrungen und die Zentralprojektion des 3D-Objekts in der Bildebene unter Berücksichtigung des leicht schrägen Beobachtungswinkels, wenn der Kollektor gedreht wird. Anschließend bestimmt der Bildanalysealgorithmus die oberen und unteren Kanten der Absorberrohrreflexion in der Bilderserie. Nichtreflektierte Flächen des Absorberrohrs im Zentrum und die Fugen zwischen den Spiegelblechen wurden dabei nicht berücksichtigt. Eine automatische Plausibilitätskontrolle nutzt die Tatsache, dass die detektierten Linien durchgehend sein müssen, genau wie Isolinien. Dadurch können die Einflüsse von fälschlicherweise ermittelten Kanten aufgrund von Schmutz, reflektierten dunklen Objekten auf dem Boden oder in der Luft und anderen Effekten minimiert werden. Das Ergebnis dieses Detektionsprozesses sind zwei Linienreihen, eine für die untere und eine für die obere Kante. Anschließend können aus diesen Informationen in Verbindung mit den bekannten geometrischen Beziehungen der Kollektorkomponenten, dem relativen Kollektoranstellwinkel sowie unter Annahme der idealen Parabelgeometrie die Steigungen rechtwinklig zur Parabolrinnenachse und mit diesen die Geometrieabweichungen und somit der Interceptfaktor berechnet werden (Ulmer 2009).

Die Messergebnisse sind in Abb. 5.16 dargestellt.

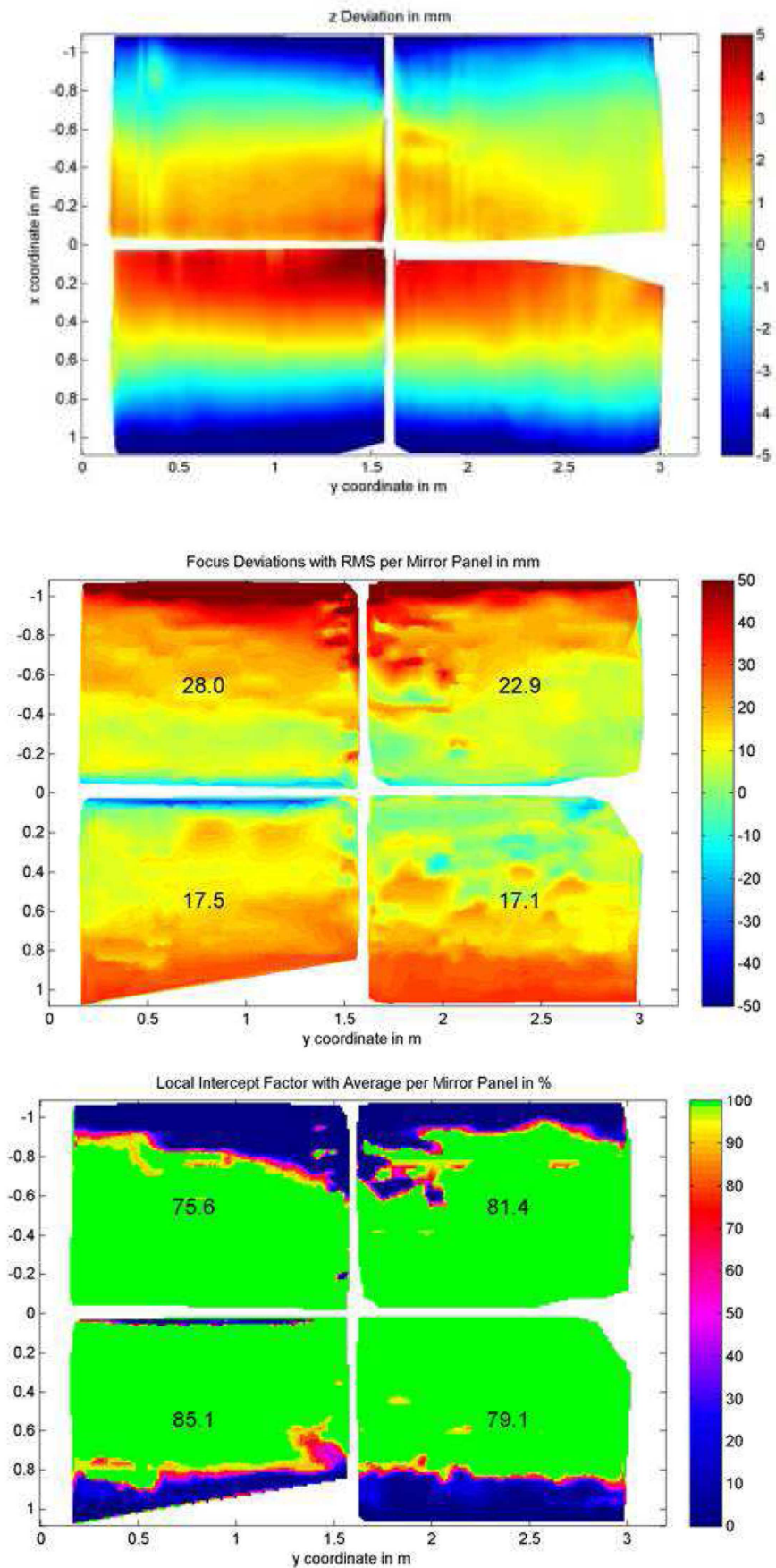


Abb. 5.16: Messergebnisse der Deflektometrie, oben: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm], Mitte: Abweichung der reflektierten Strahlen von der Fokallinie in [mm], unten: Interceptfaktor in [%]

Es ist zu erkennen, dass die Parabolrinne signifikante Maßabweichungen von bis zu 5 mm und eine damit verbundene starke Reduktion des Interceptfaktors auf einen gemittelten Wert von 80,3 % aufweist.

Aus zwei Gründen wurde die Möglichkeit, dass die durchgeführten Messungen oder deren Auswertung fehlerhaft sein könnten, in Betracht gezogen: Der erste Grund ist, dass die ermittelten Maßabweichungen der Parabolrinne und die damit verbundene Reduktion des Interceptfaktors die Erwartungen um ein Vielfaches überstiegen. Außerdem wurde erstmalig ein Kollektorelement mit der beim Großdemonstrator umgesetzten neuartigen Auflagerkonstruktion mittels der TARMES-Methode vermessen.

Zur Verifikation der mittels der Methode der Deflektometrie erhaltenen Messergebnisse wurde der Großdemonstrator zusätzlich auch noch mit der von der ersten, oben beschriebenen Messreihe unabhängigen Messmethode der Nahbereichsphotogrammetrie untersucht, welche im Folgenden beschrieben wird.

5.2.2 Digitale dreidimensionale Nahbereichsphotogrammetrie

Das Messverfahren wurde von Shortis und Johnston (*Shortis 1997*) in das Anwendungsgebiet der Solarkollektoren eingeführt und durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt weiter verbessert (*Pottler 2005*). Diese Methode ermöglicht die Vermessung einer beliebigen Oberfläche im Raum unabhängig von ihrer Orientierung.

Wie in *Pottler 2005* zusammengefasst ist die Methode der hochpräzisen Photogrammetrie ein geeignetes Werkzeug, um die 3D-Koordinaten von Spiegeloberflächen zu messen, insbesondere auch für die Analyse großer Konzentratoren (*Shortis 1996, Shortis 1997, Shortis 2008* und *Lüpfert 2003*). Anders als beispielsweise in *Riffelmann 2003* und *Ulmer 2004* beschriebene Messverfahren, mittels derer die solare Strahlung im Fokalbereich überprüft wird, liefert die Methode der Photogrammetrie direkt die Koordinaten der ausgewählten Messpunkte und ermöglicht damit die Bestimmung des Interceptfaktors des Konzentrators. Während andere Oberflächenevaluierungsmethoden auf spezielle Formen limitiert sind, zum Beispiel auf punktfokussierende Elemente (*Wendelin 1995*) (wie dies bei der (V)SHOT-Methode (*Wendelin 1991* und *Jones 1997*) oder der SCAN-Methode (*Arqueros 2003*) der Fall ist) oder auf lineare parabolische Konzentratoren (im Innenbereich (*Butler 1977* und *Köhne 1985 b*) oder ein laserstrahlbasiertes System für den Außenbereich (*Hansche 1978*)), ist die Photogrammetrie eine universell einsetzbare Methode zur Vermessung von fast jeder Art von Konzentrator oder Baustruktur.

Allgemein benutzt die Methode der Nahbereichsphotogrammetrie ein Netz zahlreicher Bilder eines zu vermessenden Zielobjekts. Diese Bilder werden von mehreren Standpunkten aus aufgenommen, um hochpräzise 3D-Koordinaten desselben zu erhalten. Ein signifikanter Vorteil der Photogrammetrie als Messwerkzeug ist, dass es ein schnelles, berührungsloses Verfahren ist, welches leicht an eine große Spanne von Objektgrößen angepasst werden kann. Des Weiteren ist die Photogrammetrie eigenständig und benötigt nur geringe Informationen von außen, solange nur die Form und die Größe des Messobjekts von Interesse sind, was bei der Vermessung des Großdemonstrators der Fall war. Der wichtigste Aspekt ist allerdings, dass pho-

togrammetrische Netzberechnungen automatisch Aussagen bezüglich der Qualität der Messungen enthalten (Pottler 2005).

Für die Vermessung des Großdemonstrators an der TU Kaiserslautern war es erforderlich, insgesamt 222 Messmarken in regelmäßigem Raster auf der Reflektoroberfläche zu applizieren (vergl. Abb. 5.17).

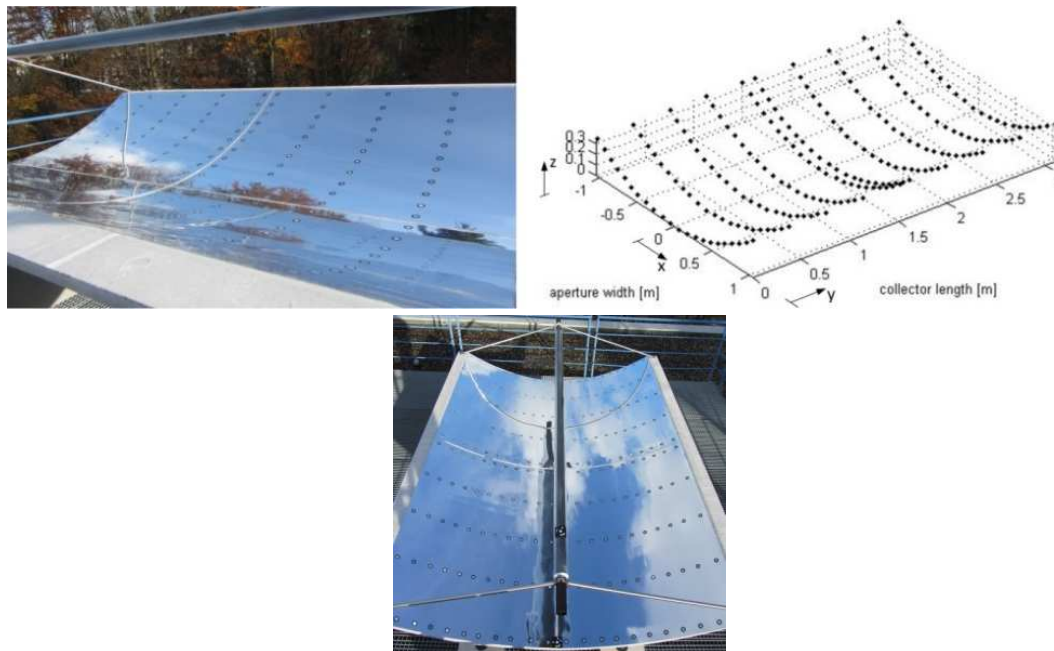


Abb. 5.17: Messverfahren 2 – Vorbereiteter Großdemonstrator für die Vermessung mittels Nahbereichsphotogrammetrie (oben: Quelle Forman 2015)

Die erzielten Ergebnisse sind in Abb. 5.18 dargestellt.

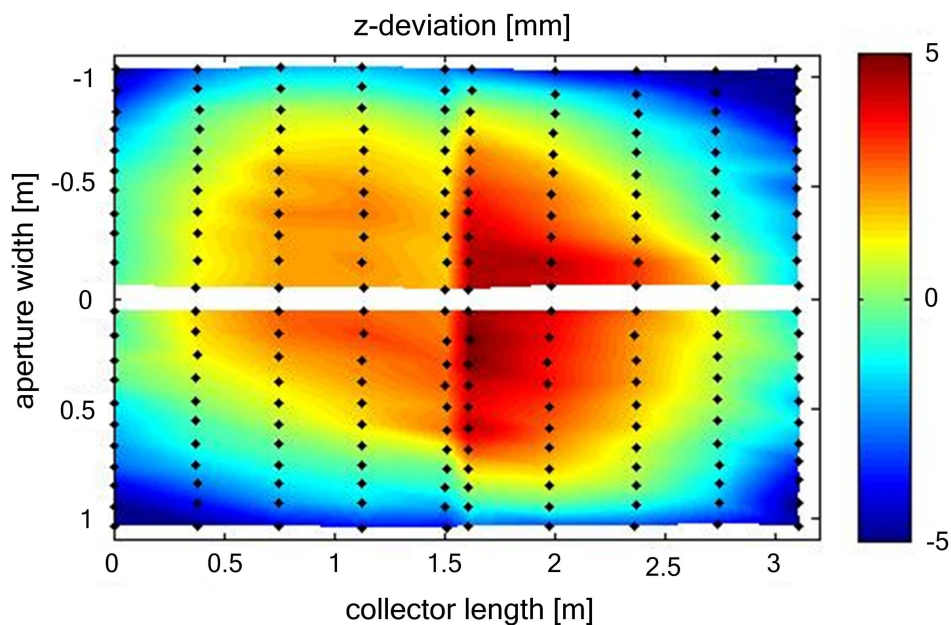


Abb. 5.18: Messergebnisse der Nahbereichsphotogrammetrie: links: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm]

Eine Bestimmung des Interceptfaktors ist grundsätzlich auch mittels der Nahbereichsphotogrammetrie möglich. Dies erfordert allerdings eine weitaus größere Anzahl an Messpunkten. Aufgrund des damit verbundenen erheblichen Mehraufwands wurde an dieser Stelle darauf verzichtet und die Methode der Photogrammetrie wurde ausschließlich zur Verifikation der Messergebnisse der Deflektometrie eingesetzt.

5.2.3 Fazit der beiden Vermessungen

In der folgenden Abb. 5.19 werden die Ergebnisse der beiden durchgeführten Messungen einander gegenüber gestellt.

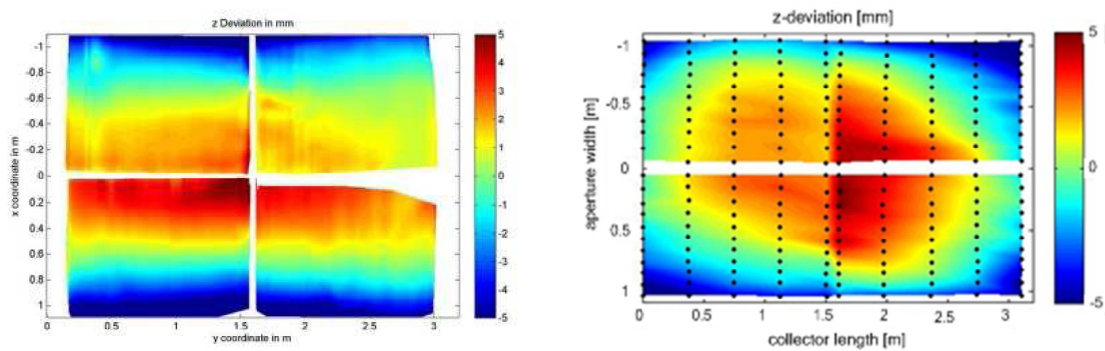


Abb. 5.19: Verifikation der Messergebnisse, Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm], links: Deflektometrie, rechts: Nahbereichsphotogrammetrie

Bei dem Vergleich der Höhenabweichung muss zunächst berücksichtigt werden, dass die Deflektometrie keinerlei Sensitivität in Kollektorlängsrichtung aufweist, was eine Schwäche dieser Messmethode darstellt. Mit dieser Methode sind ausschließlich Aussagen bezüglich der Steigungsfehler in Krümmungsrichtung möglich. Diese Schwäche konnte durch die zweite, ergänzende Vermessung mittels Nahbereichsphotogrammetrie ausgeglichen werden. Es ist zu erkennen, dass beide Vermessungen qualitativ und quantitativ übereinstimmende Verformungsergebnisse in der Krümmungsrichtung der Parabel lieferten. Die mittels der Deflektometrie bestimmten Deformationen in Rinnenquerrichtung konnten so unter Anwendung der Methode der Nahbereichsphotogrammetrie bestätigt werden. Die Messergebnisse der Deflektometrie liegen somit im Rahmen der angenommenen Messunsicherheit.

Insbesondere mit der ergänzenden Vermessung mittels der Nahbereichsphotogrammetrie konnte gezeigt werden, dass das Maximum der signifikanten Verformungen der Parabolrinne – in der Draufsicht betrachtet – im Schnittpunkt der beiden Symmetrieachsen auftritt. Von dort nehmen diese sowohl in Rinnenlängsrichtung als auch in Rinnenquerrichtung zu den Rändern hin ab.

Aus den gemessenen Verformungen wurde sowohl für die Längs- als auch für die Querrichtung ein Mittelwert bestimmt. Beide folgen einer parabolischen Funktion (Forman 2014) (vergl. Abb. 5.20).

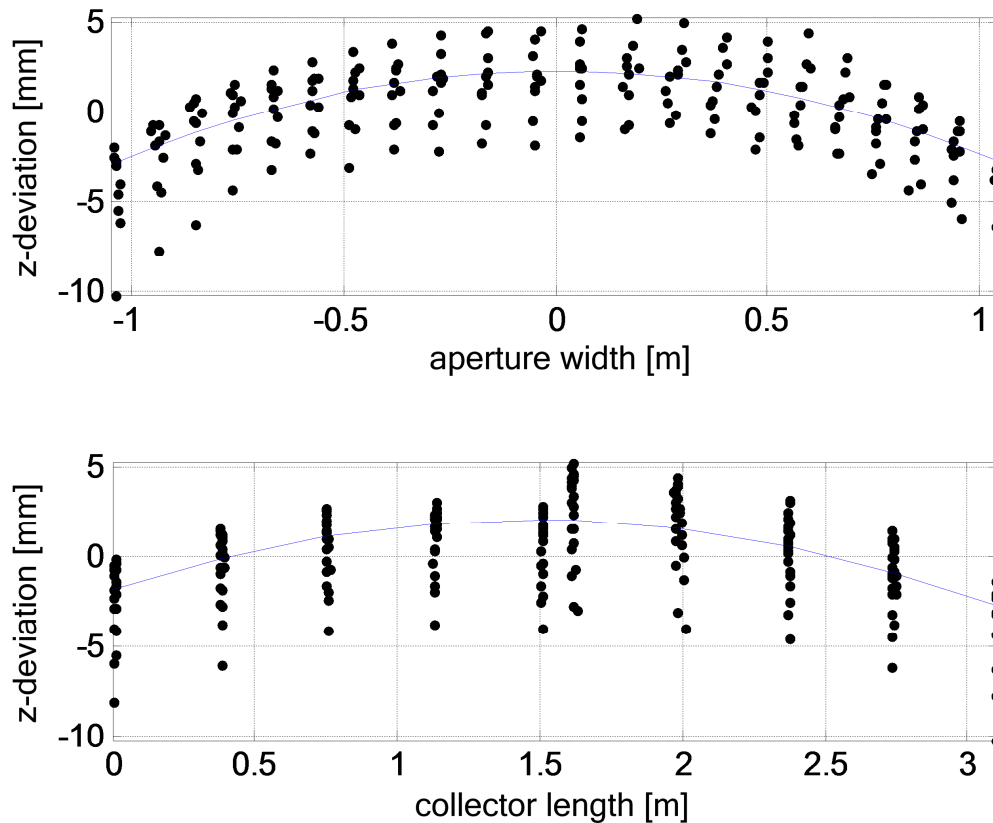


Abb. 5.20: Auswertung der Messergebnisse der Nahbereichsphotogrammetrie, oben: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in Krümmungsrichtung in [mm], unten: Höhenabweichungen von der Sollgeometrie in [mm] in Kollektorlängsrichtung (Quelle: *Forman 2014*)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die beiden unabhängig voneinander durchgeführten Messungen dieselbe Aussage getroffen werden kann: Die Ist-Geometrie der Parabolrinne des Großdemonstrators weist signifikante Abweichungen von der Soll-Geometrie auf. Der Gesamtinterceptfaktor der in vier Spiegelbleche unterteilten Reflektoroberfläche ist dadurch stark reduziert und beträgt 80,3 % (vergl. Abb. 5.16).

Die Parabolrinne ist in Querrichtung zu weit geöffnet. Die Parabolrinne wurde mit der Öffnung nach untenweisend betoniert (siehe Kapitel 8). In der Draufsicht hängen die Ecken nach unten hin durch. Es liegt also eine dominierende Globalverformung vor, der gegenüber eventuelle lokale Ungenauigkeiten der Spiegeloberfläche infolge von Ungenauigkeiten bei der Verklebung der Spiegelbleche in den Hintergrund treten.

Die Höhenabweichungen von bis zu 5 mm im Scheitel der Rinne resultieren vermutlich aus der zu geringen Steifigkeit der verwendeten Polystyrolschalung bei der Herstellung der Rinne. Unterstützt wird diese Vermutung von der Tatsache, dass die Parabolrinne kopfüber betoniert wurde, also mit der Innenseite nach untenweisend, und die Geometrieabweichung der Rinne – bezogen auf die Betonageposition (vergl. Kapitel 8) – im Scheitel ebenfalls nach unten weist. Die Verformung der Rinne gleicht einer kreisförmigen Delle (vergl. Abb. 5.18). Die Schalung wurde also durch die Eigenlast des Frischbetons – in der Draufsicht – im Schnittpunkt der beiden Symmetrie-

rieachsen am stärksten zusammengedrückt. Zu den Rändern hin verringerte sich dieser Effekt. Aufgrund der Elastizität der Schalung war eine solche kreisförmige Eindellung nach dem Ausschalen der Rinne jedoch nicht mehr erkennbar, das Rückfedern der Schalung wirkte sich positiv auf die Gesamtverformung des Bauteils aus.

Unter dem Gesichtspunkt einer großmaßstäblichen Serienproduktion von Parabolrinnen ist ohnehin offensichtlich, dass eine hochpräzise Stahlschalung erforderlich wäre. Bei einer solchen können die hier festgestellten Geometrieabweichungen und die damit einhergehende Reduktion des Interceptfaktors nicht mehr auftreten. Damit verbundene Einbußen beim Gesamtsystemwirkungsgrad infolge von Ungenauigkeiten bei der Herstellung werden auf diese Weise ausgeschlossen.

Nach Angaben des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird bei Kollektoren dieser Größe bei derzeit bestehenden Systemen angestrebt, mindestens einen Interceptfaktor von 95 bis 99 % zu erreichen, was technisch auch durchaus möglich ist.

Bei Verwendung einer hochpräzisen, jedoch um ein Vielfaches kostenintensiveren Stahlschalung anstelle der im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojekts verwendeten weicheren Polystyrolschalung ist dieses Ziel auch bei Verwendung von Nanodur[®]-Beton als Werkstoff grundsätzlich erreichbar.

Es können beispielsweise Bauteile für die Maschinenbauindustrie mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erfolgreich hergestellt werden, wie in *Sagmeister 2012 a* und *Sagmeister 2012 b* bereits gezeigt. Durch den für das Bauwesen außergewöhnlich hohen Wiederholungsfaktor bei der Fertigung solcher Kollektorelemente wären die Kosten einer solchen Stahlschalung wirtschaftlich durchaus tragbar.

6 Methodik zur Ermittlung des Interceptfaktors

Der Interceptfaktor gibt als geometrische Größe an, wieviel Prozent der reflektierten Sonnenstrahlen auf das Absorberrohr treffen. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Interceptfaktor einer gegebenen unverformten oder verformten Parabolrinne berechnet werden kann. Die Rinne wird dabei durch eine Menge von Parabolrinnenschnitten repräsentiert. Dies dient dazu, eine Aussage bezüglich einer bei Parabolrinnenkraftwerken zentralen Fragestellung treffen zu können:

Wie groß ist die Verringerung des Interceptfaktors des Großdemonstrators infolge außerplanmäßiger Verformungen, welche aus direkten und indirekten Einwirkungen resultieren?

Diese Frage soll allgemeingültig für sämtliche Verformungen beliebiger Ursache in der Meso- und Makroebene beantwortet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden aus den Lastfällen Eigenlast und Temperatur resultierende Verformungen der Parabolrinne betrachtet.

Zunächst wird der Hintergrund der obigen Fragestellung kurz erläutert. Danach wird das zur Beantwortung der Frage entwickelte Verfahren beschrieben. Anschließend werden dafür benötigte Berechnungsmethoden vorgestellt, wobei auf zwei mögliche Alternativen eingegangen wird. Letztere werden miteinander verglichen und bewertet.

6.1 Hintergrund

Nach *Ulmer 2009* ist einer der Haupteinflüsse auf die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Parabolrinnenkraftwerks die optische Qualität des Konzentratorkraftfelds. Diese hängt neben der Reflektivität der Spiegel und der Absorption des Receivers insbesondere von der geometrischen Präzision der Reflektorform ab. Abweichungen von der idealen Parabelform führen zu optischen Verlusten aufgrund von reflektierten Sonnenstrahlen, welche das Absorberrohr verfehlen. Solche Abweichungen können in der Mikroebene in Form von Oberflächenrauigkeiten, in der Mesoebene durch lokale Wellen beziehungsweise Beulen infolge des Herstellprozesses oder lokaler Beanspruchungen oder Ähnlichem oder in der Makroebene durch großflächige Formabweichungen vorliegen. Die in der Mikroebene auftretenden Fehler heutiger Spiegel sind vernachlässigbar gegenüber denen in der Meso- und Makroebene.

6.2 Methodik zur Berechnung des Interceptfaktors einer Parabolrinne

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Bestimmung des Interceptfaktors einer Parabolrinne, welche durch eine zu wählende Anzahl an Schnitten repräsentiert wird, wird im Folgenden erläutert:

1. Für jeden Parabolrinnenschnitt wird der Interceptfaktor bestimmt.
2. Der Interceptfaktor der Parabolrinne wird durch eine gewichtete Mittelwertbildung der Interceptfaktoren der einzelnen Schnitte der Parabolrinne ermittelt.

Es werden drei Annahmen getroffen:

1. Die Parabolrinnenschnitte sind derart über die Rinne verteilt, dass der erste und der letzte Schnitt gerade auf den beiden Rändern der Rinne liegen.
2. Die Sonnenstrahlen verlaufen parallel zueinander und stehen senkrecht auf dem Scheitelpunkt der Rinne.
3. Die Position des Absorberrohrs ändert sich nicht infolge von Verformung der Rinne (vergl. Abb. 6.1).

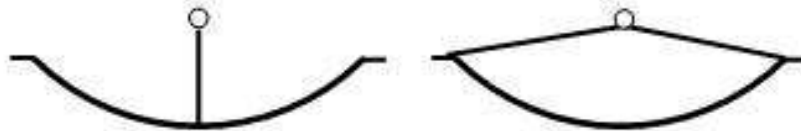


Abb. 6.1: Unveränderlichkeit der Absorberrohrposition, links: Annahme für Simulation, rechts: System Großdemonstrator

6.3 Berechnung des Interceptfaktors eines Parabolrinnenschnitts

Um den Interceptfaktor eines Parabolrinnenschnitts quantifizieren zu können, ist es erforderlich, eine Aussage darüber treffen zu können, wie viele Solarstrahlen so von der Schnittkurve reflektiert werden, dass sie auf das Absorberrohr treffen.

Hierfür wird eine gewisse Anzahl von Sonnenstrahlen vorgegeben. Anschließend wird der Anteil der Strahlen ermittelt, welche das Absorberrohr treffen.

Mathematisch formuliert bedeutet dies zu eruieren, ob eine bestimmte Gerade, also ein reflektierter Sonnenstrahl, einen Kreis mit einem definierten Durchmesser, das Absorberrohr, schneidet.

Dazu werden im Folgenden zwei Berechnungsvarianten unter Verwendung der Methoden der Vektorrechnung entwickelt und anschließend miteinander verglichen.

Die erste Variante basiert auf der Approximation der unverformten und der verformten Parabolrinnenschnittkurve durch einen Polygonzug auf Basis der mittels der Finite-Elemente-Software ANSYS® ermittelten Knotenkoordinaten.

Der zweiten Variante liegt die funktionale Form des jeweils betrachteten Parabolrinnenschnitts zugrunde. Während die Funktionsgleichung bei der unverformten Kurve explizit angegeben werden kann, liegt diese bei der verformten Geometrie nicht vor und wird daher mittels einer Regressionsanalyse approximativ ermittelt.

Nachfolgend werden beide Berechnungsvarianten entwickelt.

6.3.1 Variante 1

6.3.1.1 Entwicklung von Variante 1

In der folgenden Abb. 6.2 wird das Prinzip von Variante 1 veranschaulicht:

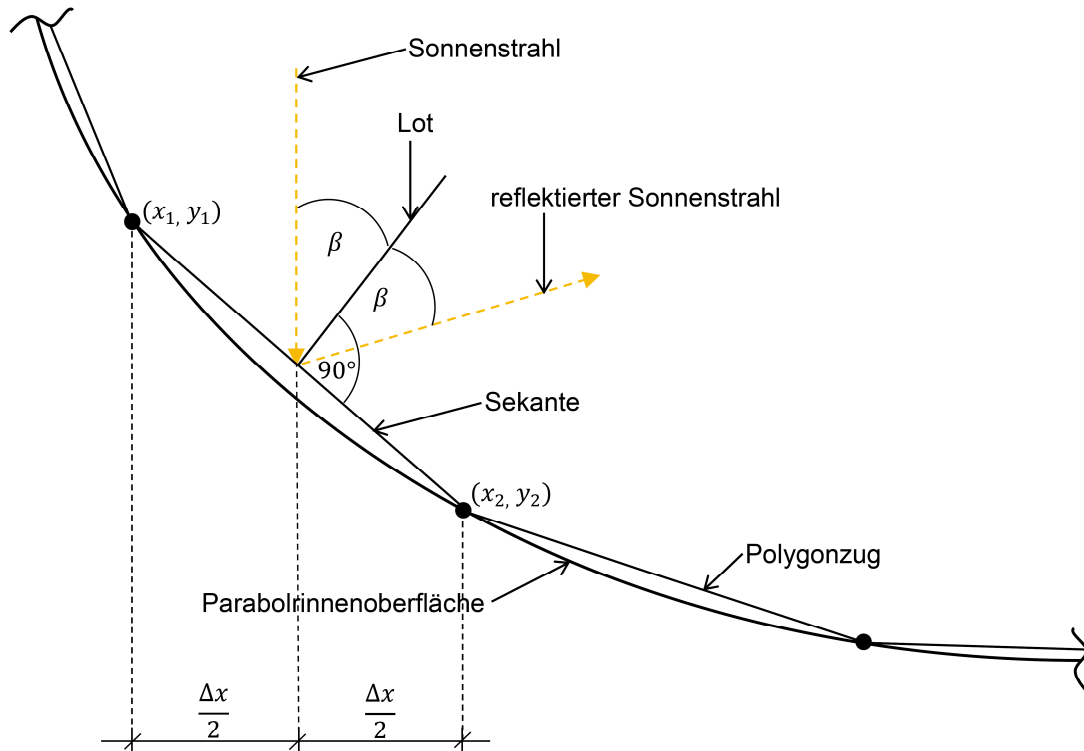


Abb. 6.2: Berechnungsgrundlage Variante 1

Mit dem hier entwickelten Algorithmus kann sowohl der Interceptfaktor des unverformten als auch eines verformten Parabolrinnenschnitts approximativ berechnet werden.

Es handelt sich um ein siebenschrittiges Verfahren.

1. Wahl der Knoten

Die Knoten, deren Koordinaten aus ANSYS[®] exportiert werden, liegen in der Form (x_i, y_i) vor. Für das hier vorgestellte Berechnungsverfahren werden exemplarisch zwei benachbarte Knoten

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$$

betrachtet.

2. Ermittlung der Sekanten

Der Parabolrinnenschnitt wird durch einen Polygonzug approximiert. Hierzu werden die Sekanten, die durch die vorgenannten Knoten verlaufen, gebildet. Die verformte Geometrie der Parabolrinne wurde durch die Verwendung der Finite-Elemente-

Methode ermittelt. Die Sekantenlänge entspricht der Größe der bei der Berechnung verwendeten finiten Elemente.

Die Sekanten werden durch den Richtungsvektor

$$\vec{r}_{\text{Sekante}} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix}$$

sowie den Aufvektor

$$\vec{a}_{\text{Sekante}} = \begin{pmatrix} x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \\ y_1 + \frac{1}{2} \cdot (y_2 - y_1) \end{pmatrix},$$

der auf die Mitte der Sekante zwischen den zwei Knoten zeigt, beschrieben.

Für jeden Punkt \vec{s}_{sek} auf der Sekante gilt somit

$$\vec{s}_{\text{sek}} = \vec{a}_{\text{Sekante}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Sekante}}, \lambda \in \mathbb{R}.$$

3. Abbildung der Sonnenstrahlen

Zwischen je zwei benachbarte Knoten wird ein Sonnenstrahl derart gelegt, dass er sich bezogen auf die x-Koordinate genau in der Mitte der beiden Knoten befindet.

Die Sonnenstrahlen werden durch den Richtungsvektor

$$\vec{r}_{\text{Sonne}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

sowie den Aufvektor

$$\vec{a}_{\text{Sonne}} = \vec{a}_{\text{Sekante}}$$

beschrieben.

Jeder Punkt \vec{s} auf dem Sonnenstrahl ist somit von der Form

$$\vec{s} = \vec{a}_{\text{Sonne}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Sonne}}, \lambda \in \mathbb{R}.$$

4. Berechnung des Lots auf den Sekanten

Die Spiegelung der Sonnenstrahlen wird an den oben beschriebenen Sekanten durchgeführt. Hierzu wird zu jeder Sekante das Lot, beschrieben durch den Aufvektor \vec{a}_{Lot} und den Richtungsvektor \vec{r}_{Lot} , bestimmt. Der Richtungsvektor muss

$$\angle(\vec{r}_{\text{Sekante}}, \vec{r}_{\text{Lot}}) = 90^\circ$$

erfüllen. Allgemein gilt für einen Winkel α zwischen zwei Vektoren \vec{u} und \vec{v}

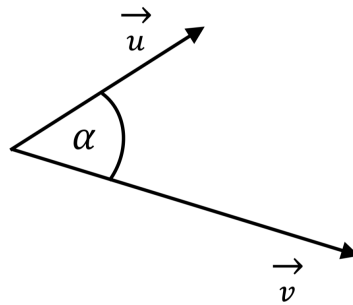


Abb. 6.3: Winkel zwischen zwei Vektoren

$$\cos(\alpha) = \frac{\text{Skalarprodukt}}{\left| \vec{u} \right| \cdot \left| \vec{v} \right|} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\left| \vec{u} \right| \cdot \left| \vec{v} \right|}$$

unter Verwendung der euklidischen Norm

$$\left| \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right| = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Gesucht wird also zunächst der unnormierte Lotvektor $\vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}}$, sodass

$$0 = \cos(90^\circ) = \frac{\vec{r}_{\text{Sekante}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}}}{\left| \vec{r}_{\text{Sekante}} \right| \cdot \left| \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}} \right|}$$

gilt. Die Normierung hat keinen Einfluss auf den Winkel. Mittels der Umformung

$$\begin{aligned} 0 = \cos(90^\circ) &= \frac{\vec{r}_{\text{Sekante}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}}}{\left| \vec{r}_{\text{Sekante}} \right| \cdot \left| \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}} \right|} \quad \left| \cdot \left| \vec{r}_{\text{Sekante}} \right| \cdot \left| \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}} \right| \right. \\ \Rightarrow 0 &= \vec{r}_{\text{Sekante}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}} \\ &= x_{r,\text{Sekante}} \cdot x_{r,\text{Lot,unnormiert}} + y_{r,\text{Sekante}} \cdot y_{r,\text{Lot,unnormiert}} \end{aligned}$$

und der Wahl

$$x_{r,\text{Lot,unnormiert}} = 1$$

ergibt sich

$$y_{r,\text{Lot,unnormiert}} = -\frac{x_{r,\text{Sekante}}}{y_{r,\text{Sekante}}}.$$

Die spezielle Wahl von $x_{r,\text{Lot,unnormiert}} = 1$ ist möglich, da in obiger Gleichung zu jedem

$x_{r,\text{Lot,unnormiert}}$ bei gegebenem $\begin{pmatrix} x_{r,\text{Sekante}} \\ y_{r,\text{Sekante}} \end{pmatrix}$ stets eine Lösung für $y_{r,\text{Lot,unnormiert}}$ gefunden

werden kann, die die Gleichung erfüllt.

Nach Normierung des Richtungsvektors des Lots erhält man:

$$\vec{r}_{\text{Lot}} = \frac{\vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}}}{|\vec{r}_{\text{Lot,unnormiert}}|}.$$

Jeder Punkt \vec{l}_{ot} auf dem Lot ist somit von der Form

$$\vec{l}_{\text{ot}} = \vec{a}_{\text{Lot}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Lot}}, \lambda \in \mathbb{R}$$

mit dem Aufvektor

$$\vec{a}_{\text{Lot}} = \vec{a}_{\text{Sekante}}.$$

5. Spiegelung der Sonnenstrahlen an der Sekante

Die Sonnenstrahlen werden unter Anwendung des Reflexionsgesetzes, welches besagt, dass der Ausfallswinkel dem Einfallswinkel entspricht, an der Sekante gespiegelt.

Wie schon die Sonnenstrahlen selbst, werden die reflektierten Sonnenstrahlen in Vektorschreibweise geschrieben, sodass für jeden Punkt \vec{r}_{S} auf dem gespiegelten Sonnenstrahl gilt

$$\vec{r}_{\text{S}} = \vec{a}_{\text{Sonne,gespiegelt}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Sonne,gespiegelt}}, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Als Aufvektor wird

$$\vec{a}_{\text{Sonne,gespiegelt}} = \vec{a}_{\text{Sonne}}$$

gewählt.

Zur Bestimmung des Richtungsvektors wird zunächst der Einfallswinkel β zwischen Sonnenstrahl und Lot ermittelt. Es gilt

$$\cos(\beta) = \frac{\vec{r}_{\text{Sonne}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot}}}{|\vec{r}_{\text{Sonne}}| \cdot |\vec{r}_{\text{Lot}}|}$$

und folglich

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos\left(\frac{\vec{r}_{\text{Sonne}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot}}}{|\vec{r}_{\text{Sonne}}| \cdot |\vec{r}_{\text{Lot}}|}\right) \\ &= \arccos(\vec{r}_{\text{Sonne}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot}}) \\ &= \arccos\left(\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{r,\text{Lot}} \\ y_{r,\text{Lot}} \end{pmatrix}\right) \\ &= \arccos(-y_{r,\text{Lot}}), \end{aligned}$$

da nach Konstruktion

$$\left| \vec{r}_{\text{Sonne}} \right| = \left| \vec{r}_{\text{Lot}} \right| = 1$$

gilt. Der unnormierte Richtungsvektor der gespiegelten Sonnenstrahlen $\vec{r}_{\text{Sonne, gespiegelt, u}}$ muss

$$\angle(\vec{r}_{\text{Sonne, gespiegelt, u}}, \vec{r}_{\text{Lot}}) = -\beta$$

erfüllen. Hierzu wird die folgende Umformung betrachtet:

$$\begin{aligned} \cos(-\beta) &= \frac{\vec{r}_{\text{Sonne, gespiegelt, u}} \cdot \vec{r}_{\text{Lot}}}{\left| \vec{r}_{\text{Sonne, gespiegelt, u}} \right| \cdot \left| \vec{r}_{\text{Lot}} \right|} \\ & \quad \left| \vec{r}_{\text{Lot}} \right| = 1 \\ \Leftrightarrow \cos(-\beta) &= \frac{x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot x_{r, \text{Lot}}^- + y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot y_{r, \text{Lot}}^-}{\sqrt{x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2 + y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2}} \\ \Leftrightarrow (\cos(-\beta))^2 &\cdot (x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2 + y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2) \\ &= (x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot x_{r, \text{Lot}}^- + y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot y_{r, \text{Lot}}^-)^2 \\ \Leftrightarrow 0 &= x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2 \cdot (x_{r, \text{Lot}}^2 - (\cos(-\beta))^2) \\ & \quad + 2 \cdot x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot x_{r, \text{Lot}}^- \cdot y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot y_{r, \text{Lot}}^- \\ & \quad + (y_{r, \text{Lot}}^2 - (\cos(-\beta))^2) \cdot y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2 \end{aligned}$$

Unter Verwendung der Nebenrechnung

$$\begin{aligned} \cos(-\beta) &= \cos(-\arccos(-y_{r, \text{Lot}}^-)) \\ &= \cos(\arccos(-y_{r, \text{Lot}}^-)) \\ &= -y_{r, \text{Lot}}^- \end{aligned}$$

ergibt sich

$$y_{r, \text{Lot}}^2 - (\cos(-\beta))^2 = 0.$$

Und somit

$$\begin{aligned} 0 &= x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^2 \cdot (x_{r, \text{Lot}}^2 - y_{r, \text{Lot}}^2) \\ & \quad + 2 \cdot x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot x_{r, \text{Lot}}^- \cdot y_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- \cdot y_{r, \text{Lot}}^- \end{aligned}$$

Aus der Wahl

$$x_{r, \text{Sonne, gespiegelt, u}}^- = 1$$

folgt

$$0 = x_{r,\text{Lot}}^2 - y_{r,\text{Lot}}^2 + 2 \cdot x_{r,\text{Lot}} \cdot y_{r,\text{Lot}} \cdot y_{r,\text{Sonne,gespiegelt,u}}$$

und daher

$$y_{r,\text{Sonne,gespiegelt,u}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{x_{r,\text{Lot}}^2 - y_{r,\text{Lot}}^2}{x_{r,\text{Lot}} \cdot y_{r,\text{Lot}}}$$

Die Normierung liefert:

$$\vec{r}_{\text{Sonne,gespiegelt}} = \frac{\vec{r}_{\text{Sonne,gespiegelt,u}}}{|\vec{r}_{\text{Sonne,gespiegelt,u}}|}$$

6. Ermittlung des Schnittpunkts von reflektierten Sonnenstrahlen und Absorberrohr

In diesem letzten Schritt wird ermittelt, ob der reflektierte Sonnenstrahl in das Absorberrohr trifft. Hierzu wird zunächst das Absorberrohr als Kreis in Vektorform beschrieben. Die entstehende Kreisgleichung wird mit der Geradengleichung des reflektierten Sonnenstrahls gleichgesetzt, um mögliche Schnittpunkte zu finden. Die Vektorform des Absorberrohrs ist gegeben durch

$$\vec{k} = \vec{s}_{\text{Absorber}} + R_{\text{Absorber}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{pmatrix}, \quad \text{wobei } 0 \leq \gamma \leq 360^\circ$$

und der Stützvektor

$$\vec{s}_{\text{Absorber}} = \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \end{pmatrix}$$

durch den Fokelpunkt F gegeben ist und R_{Absorber} den Radius des Absorberrohrs bezeichnet.

Die Kreisgleichung wird nun mit der Geradengleichung gleichgesetzt. Dies führt zu dem folgenden Gleichungssystem:

$$\text{I) } x_F + R_{\text{Absorber}} \cdot \cos(\gamma) = x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} + \lambda \cdot x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}$$

$$\text{II) } y_F + R_{\text{Absorber}} \cdot \sin(\gamma) = y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} + \lambda \cdot y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}$$

$$\text{I) } \cos(\gamma) = \left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F + \lambda \cdot x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \right) \cdot \frac{1}{R_{\text{Absorber}}}$$

$$\text{II) } \sin(\gamma) = \left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F + \lambda \cdot y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \right) \cdot \frac{1}{R_{\text{Absorber}}}$$

$$\begin{aligned} \text{I) } (\cos(\gamma))^2 &= \frac{1}{R_{\text{Absorber}}^2} \cdot \left(\left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right) \cdot x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \cdot \lambda \right. \\ &\quad \left. + x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 \cdot \lambda^2 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{II) } (\sin(\gamma))^2 &= \frac{1}{R_{\text{Absorber}}^2} \cdot \left(\left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right) \cdot y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \cdot \lambda \right. \\ &\quad \left. + y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 \cdot \lambda^2 \right) \end{aligned}$$

Da $(\cos(\gamma))^2 + (\sin(\gamma))^2 = 1$ gilt, erhält man nach Addition von I und II

$$\begin{aligned} \text{I) } 1 &= \frac{1}{R_{\text{Absorber}}^2} \cdot \left(\left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right)^2 + \left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot \left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right) \cdot x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \right. \\ &\quad \left. + \left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right) \cdot y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}} \right) \cdot \lambda \\ &\quad \left. + \left(x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 + y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 \right) \cdot \lambda^2 \right) \end{aligned}$$

und ferner :

$$\begin{aligned} \text{I) } 0 &= \frac{\left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right)^2 + \left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right)^2 - R_{\text{Absorber}}^2}{x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 + y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2} \\ &\quad + 2 \cdot \frac{\left(x_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - x_F \right) \cdot x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}}{x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 + y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2} \cdot \lambda \\ &\quad + 2 \cdot \frac{\left(y_{\bar{a}, \text{Sonne, gespiegelt}} - y_F \right) \cdot y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}}{x_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2 + y_{\bar{r}, \text{Sonne, gespiegelt}}^2} \cdot \lambda + \lambda^2 \end{aligned}$$

Diese quadratische Gleichung in λ hat die folgende allgemeine Lösung

$$\lambda_{1/2} = - \frac{\overbrace{\left(x_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - x_{\text{F}} \right) \cdot x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^-}_{=A}}{x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2} - \frac{\overbrace{\left(y_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - y_{\text{F}} \right) \cdot y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^-}_{=B}}{x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2} \pm \left(\frac{(A+B)^2}{\left(x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 \right)^2} - \frac{\left(x_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - x_{\text{F}} \right)^2 + \left(y_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - y_{\text{F}} \right)^2 - R_{\text{Absorber}}^2}{x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2} \right)^{1/2}$$

Ob nun eine, zwei oder gar keine Lösung existiert, hängt von dem Term

$$D = \frac{(A+B)^2}{\left(x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 \right)^2} - \frac{\left(x_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - x_{\text{F}} \right)^2 + \left(y_{\text{a,Sonne,gespiegelt}}^- - y_{\text{F}} \right)^2 - R_{\text{Absorber}}^2}{x_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2 + y_{\text{r,Sonne,gespiegelt}}^2}$$

unter der Wurzel, der im Folgenden als Determinante bezeichnet wird, ab.

Die folgenden drei Fälle können eintreten:

- $D > 0$: Es gibt zwei Schnittpunkte von Gerade und Kreis. Der reflektierte Sonnenstrahl durchdringt das Absorberrohr mathematisch.
- $D = 0$: Es gibt einen Schnittpunkt von Gerade und Kreis, genauer gesagt einen Berührungspunkt. Der reflektierte Sonnenstrahl trifft gerade noch den Rand des Absorberrohrs.
- $D < 0$: Es gibt keinen Schnittpunkt von Gerade und Kreis. Der reflektierte Sonnenstrahl verfehlt das Absorberrohr.

7. Ermittlung des Interceptfaktors der Parabel

Für alle Paare benachbarter Knoten (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) , $i=1, \dots, N-1$, der betrachteten Parabel werden die vorgenannten Schritte 2 bis 6 durchgeführt und somit die jeweiligen Determinanten D_i bestimmt. Hierbei bezeichnet N die Anzahl der Knoten.

Der approximative Interceptfaktor IF ist dann unter Verwendung der Indikatorfunktion

$$1_{D_i \geq 0} = \begin{cases} 1, & \text{falls } D_i \geq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

gegeben durch

$$IF = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} 1_{D_i \geq 0}$$

und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.

Anmerkung: Es gilt zu beachten, dass die Approximation des Interceptfaktors IF umso genauer wird, je dichter die Knoten auf der Parabel liegen und je höher deren Anzahl ist.

Dieser Algorithmus wurde in Microsoft Excel programmiert. Auf diese Weise können beliebige Knotenkoordinaten, beispielsweise aus ANSYS®, tabellarisch importiert und der jeweilige Interceptfaktor ausgegeben werden (vergl. Abb. 6.4).

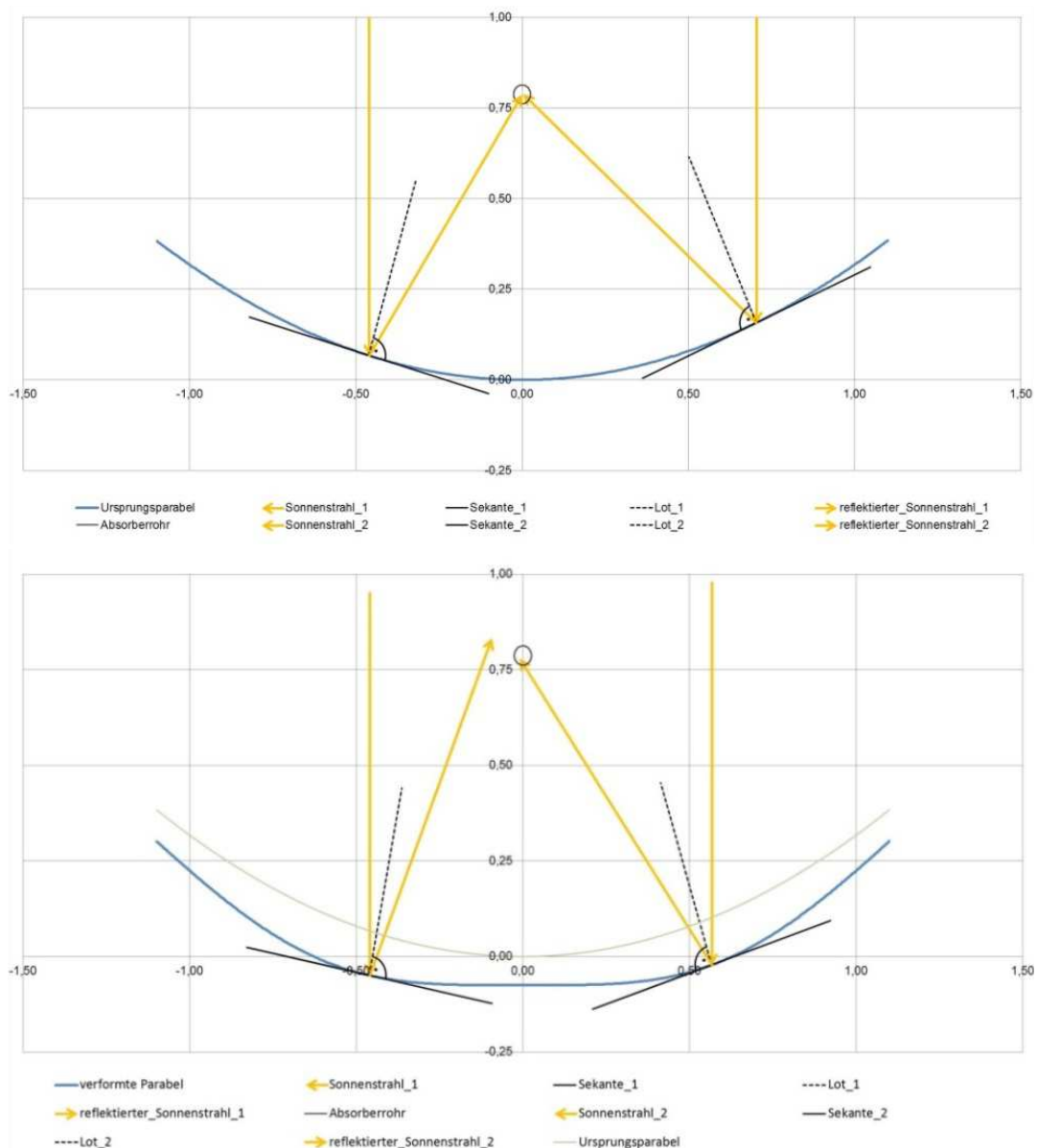


Abb. 6.4: oben: Anwendung von Variante 1 für die unverformte Parabolrinne, unten: Anwendung von Variante 1 für eine verformte Parabolrinne (exemplarisch, stark überhöht)

6.3.1.2 Verifikation von Variante 1 – Ermittlung des Interceptfaktors des unverformten Parabolrinnenschnitts

Zur Verifikation des oben entwickelten Algorithmus wurde dieser zuerst am unverformten System angewendet. Die Geometrie der gesamten Parabolrinne folgt in diesem Zustand der idealen Parabel. Die Geometrien sämtlicher Schnitte unterscheiden sich nicht voneinander. Alle reflektierten Sonnenstrahlen treffen sich im Fokuspunkt und daher auch das Absorberrohr.

Das Berechnungsergebnis in diesem Zustand muss für den approximativen Interceptfaktor vor dem Hintergrund der großen Knotenanzahl $N = 478$ das Resultat $IF = 100 \%$ liefern.

Dies war auch das Ergebnis der in Excel durchgeführten Berechnungen.

6.3.2 Variante 2

6.3.2.1 Entwicklung von Variante 2

In der folgenden Abb. 6.5 wird das Prinzip von Variante 2 veranschaulicht:

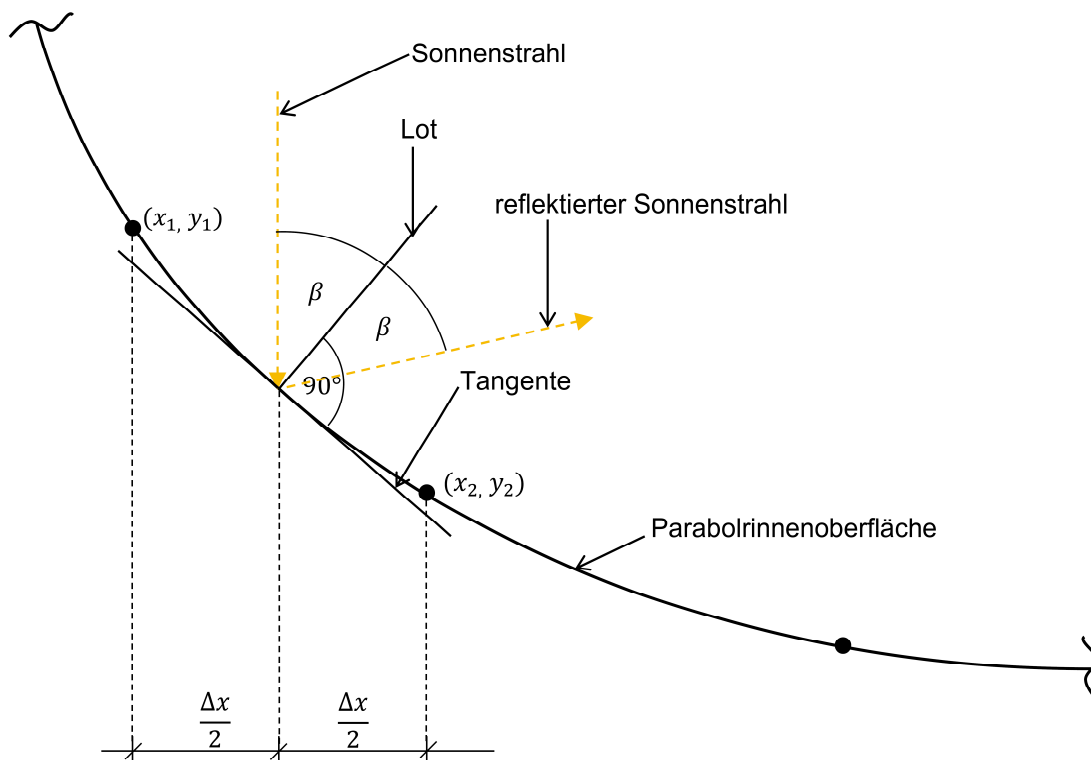


Abb. 6.5: Berechnungsgrundlage Variante 2

Im Unterschied zur ersten Variante, bei der auf Sekanten der Parabel abgestellt wurde, werden hier nun die Tangenten derselben zugrunde gelegt. Daher muss im Falle der verformten Parabel zunächst deren funktionale Form approximativ ermittelt werden. Das geschieht mithilfe einer Regressionsanalyse. Dieser Schritt entfällt bei der unverformten Ursprungsparabel, da deren Funktionsgleichung y bereits bekannt

ist (vergl. Kapitel 3.4). Die Funktionsgleichung der unverformten Parabel wird im Folgenden zum besseren Verständnis mit y_{UP} bezeichnet.

Auch bei Variante 2 handelt es sich um ein siebenschrittiges Verfahren, das im Folgenden näher vorgestellt wird.

1. Wahl der Knoten

Die Knoten, deren Koordinaten aus ANSYS[®] exportiert werden, liegen in der Form (x_i, y_i) vor. Für das hier vorgestellte Berechnungsverfahren werden exemplarisch zwei benachbarte Knoten

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$$

betrachtet.

2. Ermittlung der Tangenten

Die Tangenten der Ursprungsparabel werden durch den Aufvektor,

$$\vec{a}_{\text{Tangente,UP}} = \begin{pmatrix} x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \\ y_{UP} \left(x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \right) \end{pmatrix},$$

der auf die Mitte des Parabelabschnitts zwischen den zwei Knoten zeigt, sowie den Richtungsvektor

$$\vec{r}_{\text{Tangente,UP}} = \begin{pmatrix} 1 \\ y'_{UP} \left(x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \right) \end{pmatrix}$$

beschrieben. Hierbei bezeichnet y'_{UP} die Ableitung der Funktionsgleichung y_{UP} der unverformten Parabel.

Für jeden Punkt $\vec{\text{tan}}_{UP}$ auf der Tangente der unverformten Parabel gilt somit

$$\vec{\text{tan}}_{UP} = \vec{a}_{\text{Tangente,UP}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Tangente,UP}}, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Bevor eine Tangente für die verformte Parabel angegeben werden kann, muss deren Funktionsgleichung y_{VP} approximativ ermittelt werden. Hierzu wurde in EXCEL eine Regression durchgeführt, bei der ein Polynom zehnten Grades unterstellt wurde. Dies ist ausreichend, da die Ursprungsparabel per definitionem ein Polynom zweiten Grades ist und die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Verformungen derselben die polynomiale Eigenschaft nicht signifikant stören. Die Funktionsgleichung der verformten Parabel ist somit allgemein gegeben durch

$$y_{VP}(x) = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_{10} x^{10} + b$$

und

$$y'_{VP}(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + 4a_4x^3 + \dots + 10a_{10}x^9,$$

wobei die a_i und b durch die Regression bestimmt wurden.

Die Tangenten der verformten Parabel werden durch den Aufvektor

$$\vec{a}_{\text{Tangente,VP}} = \begin{pmatrix} x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \\ y_{VP} \left(x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \right) \end{pmatrix},$$

der auf die Mitte des Parabelabschnitts zwischen den zwei Knoten zeigt, sowie den Richtungsvektor

$$\vec{r}_{\text{Tangente,VP}} = \begin{pmatrix} 1 \\ y'_{VP} \left(x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \right) \end{pmatrix}$$

beschrieben. Für jeden Punkt $\vec{\text{tan}}_{VP}$ auf der Tangente der unverformten Parabel gilt somit

$$\vec{\text{tan}}_{VP} = \vec{a}_{\text{Tangente,VP}} + \lambda \cdot \vec{r}_{\text{Tangente,VP}}, \lambda \in \mathbb{R}.$$

3. Verbleibende Schritte

Die verbleibenden Schritte der zweiten Berechnungsvariante sind vollständig analog zu den Schritten 3 bis 7 des ersten Verfahrens. Hierbei muss lediglich der Begriff „Sekante“ durch „Tangente,UP“ beziehungsweise „Tangente,VP“ ersetzt werden.

6.3.2.2 Verifikation von Variante 2 – Ermittlung des Interceptfaktors der unverformten Parabolrinne

Zur Verifikation des Algorithmus der zweiten Variante wurde dieser ebenfalls zuerst am unverformten System angewendet. Auch hier lieferten die in Excel durchgeführten Berechnungen einen Interceptfaktor $IF = 100 \%$.

6.3.3 Vergleich und Bewertung der beiden Varianten

Stellt man die beiden Varianten zur Ermittlung des Interceptfaktors einander gegenüber, so ist das Folgende festzuhalten:

Bei der ersten Variante werden die Sonnenstrahlen nicht direkt an der Parabel selbst, sondern an deren Sekanten gespiegelt.

Bei der zweiten Variante erfolgt die Spiegelung der Sonnenstrahlen an den Tangenten der exakten unverformten beziehungsweise approximierten verformten Parabel.

In Bezug auf die unverformte Ursprungsparabel liefert die Betrachtung der Sekanten in der ersten Variante nur eine Näherung des Interceptfaktors, da auch die Sekanten nur eine Näherung der Parabel darstellen. Der dadurch entstehende Fehler ist aber aufgrund der großen Feinheit der finiten Elemente im dieser Arbeit zugrunde liegenden Fall vernachlässigbar. Da die zweite Variante auf den Tangenten basiert, führt

dieses Verfahren bei der unverformten Parabel zum im Rahmen des Rasters der finiten Elemente exakten Interceptfaktor.

Aufgrund der Tatsache, dass für die verformte Parabel keine exakte Funktionsgleichung angegeben werden kann, weichen die Berechnungsergebnisse der beiden Varianten leicht voneinander ab. Zunächst ist festzuhalten, dass beide Varianten entweder durch die Verwendung der Sekanten oder durch den Einsatz der Tangenten der approximierten Funktion lediglich Näherungen des tatsächlichen Interceptfaktors liefern können. Weil jedoch davon auszugehen ist, dass die Verwendung der Sekanten bei der großen Feinheit der finiten Elemente eine bessere Approximation der verformten Parabel liefert als der Einsatz einer Regression auf ein Polynom zehnten Grades, ist die erste Variante zu bevorzugen.

Aufgrund der Regression auf ein Polynom zehnten Grades wirken sich lokale Störungen der Parabel in Variante 2 auf die gesamte Parabel aus, während bei Verwendung der Sekanten in Variante 1 sich diese lokalen Störungen auch nur lokal auf die Berechnung des Interceptfaktors auswirken.

Wegen der vorgenannten Überlegungen wird im Folgenden die erste Variante zur Ermittlung des Interceptfaktors verwendet. Die zweite Variante dient lediglich zur Plausibilitätskontrolle.

6.4 Berechnung des Interceptfaktors einer Parabolrinne

Nachdem nun der Interceptfaktor für einen Schnitt berechnet wurde, kann nun der Interceptfaktor einer Parabolrinne ermittelt werden.

Seien hierzu IF_i , $i=1, \dots, M$, die Interceptfaktoren der M Schnitte, die die Parabolrinne repräsentieren. Der Abstand des i -ten zum $(i+1)$ -ten Schnitt wird mit d_i , $i=1, \dots, M-1$, bezeichnet. Das Ziel ist es, die Interceptfaktoren eines jeden Schnitts mit der Breite des „Einflussbereichs“ dieses Schnitts zu gewichten. Unter dem „Einflussbereich“ eines Parabolrinnenschnitts wird dabei der halbe Abstand der zum betrachteten Schnitt benachbarten zwei Schnitte voneinander verstanden. Da der erste und der letzte Schnitt am Rand der Parabolrinne liegen und diese somit nur einen benachbarten Schnitt aufweisen, ist der „Einflussbereich“ der Randschnitte definiert als der halbe Abstand des Randschnitts zu dessen benachbartem Schnitt. Diese Gewichtung ist einer Gleichgewichtung vorzuziehen, da letztere die Ränder der Parabolrinne und Bereiche mit einer großen Anzahl an Schnitten zu stark gewichten würde.

Die folgende Abb. 6.6 verdeutlicht die beschriebene Gewichtungssystematik.

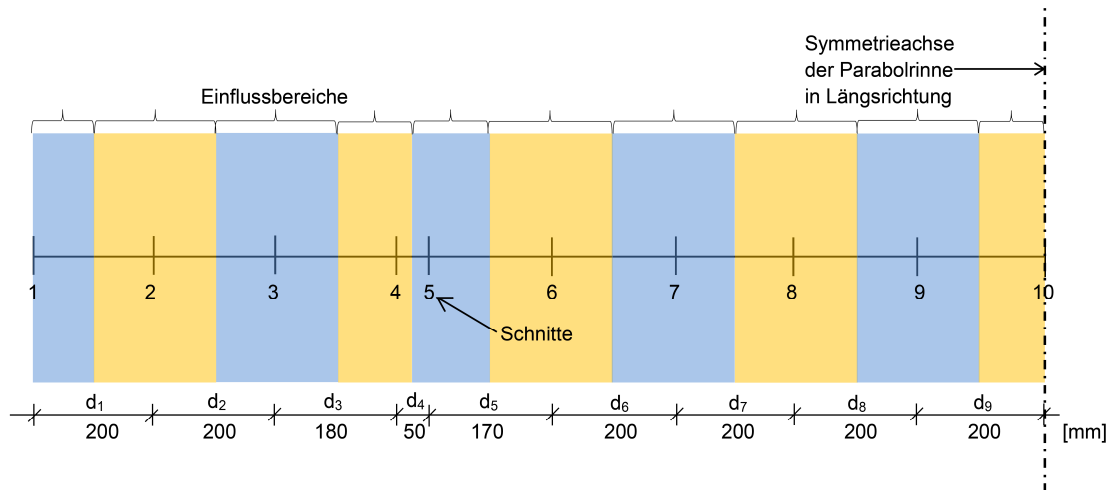


Abb. 6.6: Gewichtungssystematik bei der Berechnung des Gesamtinterceptfaktors

Die Gewichte w_i , $i=1, \dots, M$, der einzelnen Interceptfaktoren IF sind somit gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 - \quad w_1 &= \frac{d_1}{2 \cdot \sum_{i=1}^{M-1} d_i} \\
 - \quad w_i &= \frac{d_{i-1} + d_i}{2 \cdot \sum_{j=1}^{M-1} d_j}, \text{ für } i = 2, \dots, M-1 \\
 - \quad w_M &= \frac{d_{M-1}}{2 \cdot \sum_{i=1}^{M-1} d_i}
 \end{aligned}$$

Dabei ist die Summe im Nenner erforderlich, damit sich die Gewichte auf eins aufsummieren.

Folglich ergibt sich der Interceptfaktor der Parabolrinne als

$$\text{IF} = \sum_{i=1}^M w_i \cdot \text{IF}_i.$$

In Kapitel 7 wird der Interceptfaktor für den Großdemonstrator unter Anwendung der soeben entwickelten Berechnungsverfahren ermittelt.

7 Modellierung des Großdemonstrators zur Herstellungsoptimierung und zur Ermittlung von standortabhängigen Interceptfaktoren

In diesem Kapitel wird zum einen die Ermittlung der optimalen Herstellgeometrie der Parabolrinne unter Berücksichtigung ihres Schwindverhaltens beschrieben, zum anderen werden ihre jeweiligen Interceptfaktoren während des Betriebs ermittelt.

Zunächst wird das Schwinden mittels einer Finite-Elemente-Analyse untersucht.

Danach wird auf den Interceptfaktor des Großdemonstrators unter realitätsnahen Betriebsbedingungen am Standort Plataforma Solar de Almería eingegangen. So werden realistische Verformungen der Parabolrinne infolge direkter und indirekter Einwirkungen, ebenfalls mittels Finite-Elemente-Analysen, ermittelt. Anschließend wird durch Anwendung der in Kapitel 6 entwickelten Berechnungsverfahren der jeweilige zeitabhängige Interceptfaktor des verformten Kollektorelements bestimmt.

Die Simulation basiert auf der Sollgeometrie der Parabolrinne. Ausgehend von dieser perfekten Parabel wurde deren Verformung unter Temperatur- und Eigenlasteinflüssen ermittelt. Initialverformungen infolge der Herstellung sowie Windlasten wurden nicht berücksichtigt.

7.1 Finite-Elemente-Analysen und Generierung des Modells

An dieser Stelle wird zunächst ein Überblick über die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen sowie der Modellerstellung gegeben. Die einzelnen Berechnungen werden im Folgenden genauer erläutert.

Das durchgeführte Berechnungsschema ist zur Veranschaulichung in Abb. 7.1 dargestellt und wird im Anschluss genauer beschrieben.

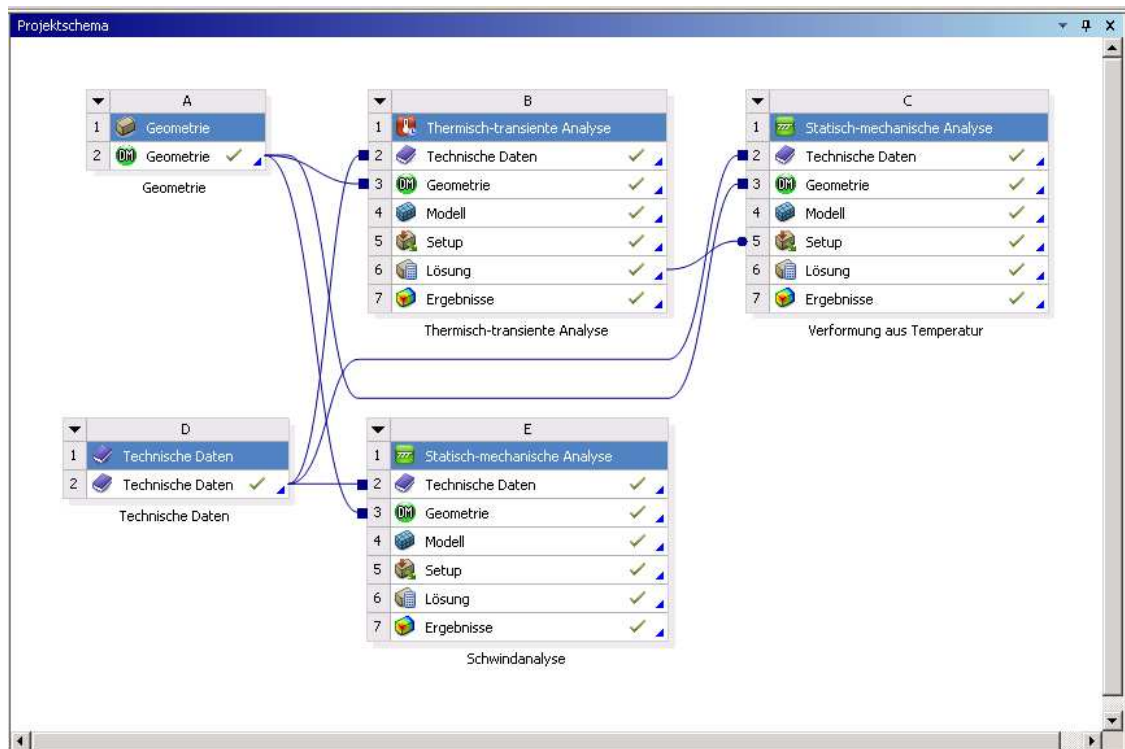


Abb. 7.1: Ablaufschema der mittels ANSYS® durchgeführten Finite-Elemente-Analysen

Parablrinnen werden der Sonne über deren Tagesgang nachgeführt. Zu jedem Zeitpunkt gehört demzufolge eine bestimmte Stellung der Rinne zwischen -70° und 70° bezogen auf die Vertikale. Diese Rotation konnte in dem in Abb. 7.1 gezeigten Berechnungsablauf nicht modelliert werden. Die Eigenlast wurde daher für alle der unten gezeigten 15 Zeitschritte in der 0° -Stellung angesetzt, da diese das Tagesmittel darstellt (vergl. Abb. 7.2). In dieser Arbeit wird nur die 12 Uhr-Stellung der Parabolrinne betrachtet, da für sie die ungünstigste Verformungsfigur in Hinblick auf die Eigenlast erwartet wird.

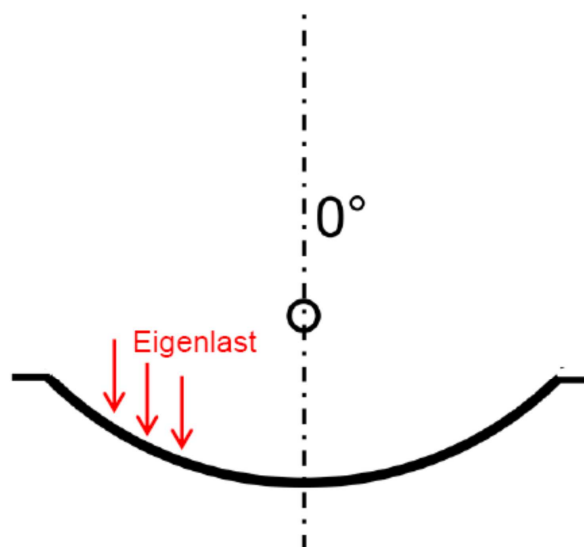


Abb. 7.2: 12 Uhr-Stellung mit angetragener Eigenlast

Windlasten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da die Projektpartner der Ruhr-Universität Bochum sich mit dieser Fragestellung befassten, was beispielsweise in *Forman 2012*, *Forman 2013* und *Müller 2013 b* beschrieben ist.

7.2 Finite-Elemente-Berechnung

7.2.1 Generierung des Finite-Elemente-Modells

Es wurde ein Finite-Elemente-Modell der Parabolrinne des Großdemonstrators erstellt. Um die Geometrie der Parabolrinne in ANSYS® zu erzeugen wurden die mittels „AutoCAD“ erstellten CAD-Daten“ (vergl. Kapitel 3) importiert. Außerdem wurden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Materialparameter in der FE-Analyse hinterlegt.

Anschließend wurden auf der Schalenunterseite zwei 2D-Flächen aufgeprägt, welche im späteren Verlauf für die Simulation der beiden Auflager der Parabolrinne benötigt wurden.

Danach wurden zehn Schnitte zur späteren Berechnung des Interceptfaktors der Rinne festgelegt. Schnitt 4 und 5 befinden sich an den Auflagergrenzen, Schnitt 10 liegt auf der Symmetrieachse in Schalenlängsrichtung (vergl. Abb. 7.3).

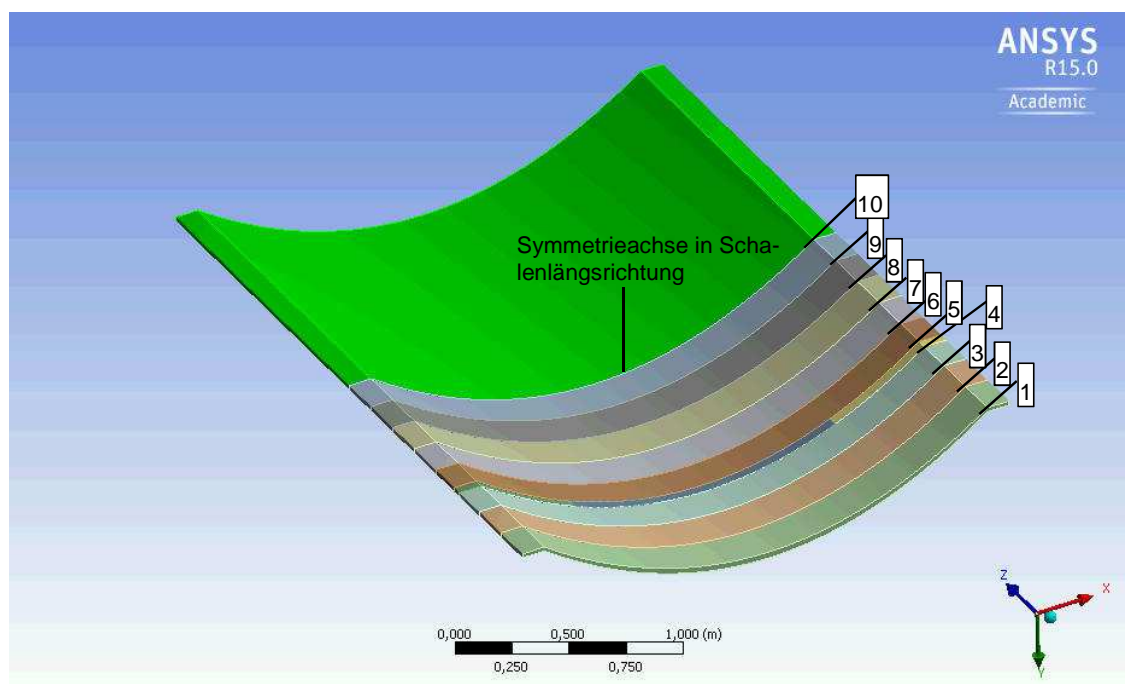


Abb. 7.3: Mittels ANSYS® erzeugtes Modell des Großdemonstrators mit den zehn festgelegten Schnitten

7.2.2 Materialparameter und Randbedingungen

Im Rahmen der in Abb. 7.1 dargestellten Finite-Elemente-Analyse waren mehrere Eingangsparameter und Bedingungen zu hinterlegen. Diese sind in der nachfolgenden Tab. 7.1 aufgelistet. Einige wurden in vorhergehenden Kapiteln bereits ermittelt, die übrigen werden im Folgenden genauer beschrieben.

Tab. 7.1: Verwendete Materialparameter

Thermisch-transiente Analyse		
Materialeigenschaften		
Rohdichte $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	2524	vergl. Kapitel 4
Thermische Leitfähigkeit $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	2	vergl. Kapitel 4
Spezifische Wärmekapazität $c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	880	Annahme
Randbedingungen		
Wärmeübergangskoeffizient $a \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	25	Annahme
Umgebungslufttemperatur $T_{Umgebung} [^{\circ}C]$	variabel	
Anfangstemperatur $T_{Anfang} [^{\circ}C]$	20	Annahme
Statisch-mechanische Analyse		
Materialeigenschaften		
Rohdichte $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	2524	vergl. Kapitel 4
Elastizitätsmodul $E_{C,S} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	47.593	vergl. Kapitel 4
Randbedingungen		
Importierte Körpertemperatur		
Fixierte Lagerung		

7.2.3 Erstellung des Finite-Elemente-Netzes

In diesem Arbeitsschritt wurde die Geometrie der Parabolrinne für die Berechnungsmodule „Thermisch-transiente Analyse“ und „Statisch-mechanische Analyse“ durch Finite-Elemente-Netze abgebildet (vergl. Abb. 7.4). Optisch unterscheiden sich diese nicht voneinander.

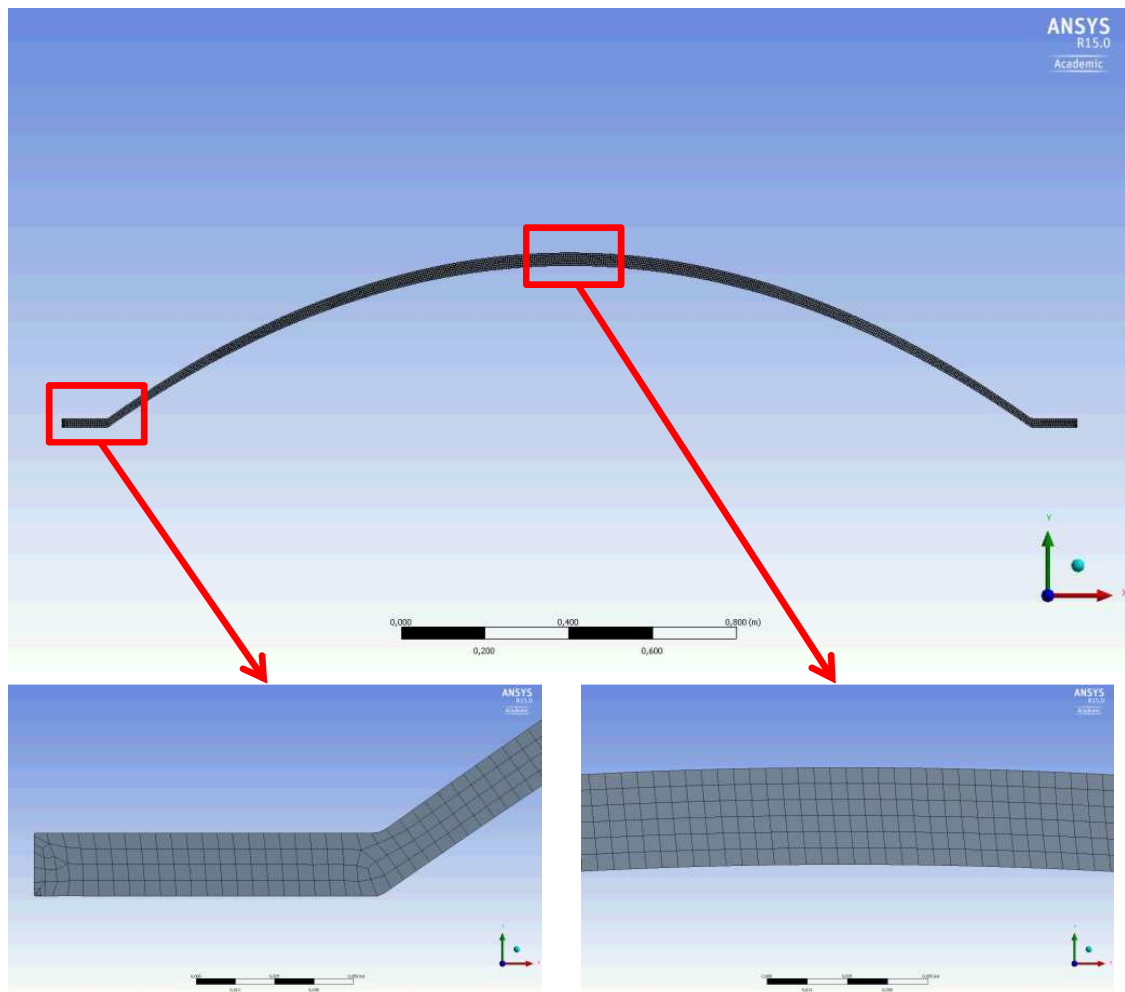


Abb. 7.4: Finite-Elemente-Netz der Parabolrinne

7.2.3.1 Netz „Thermisch-transiente Analyse“

Es wurden 827.292 Elemente, hauptsächlich Hexaeder, mit 3.896.901 Knoten verwendet. Die Elementkantenlänge auf der Parabolrinneninnenseite betrug 5 mm, die anderen waren variabel. Der Bereich der Randbalken, wo die Schalendicke der Parabolrinne 20 mm beträgt, wurde dadurch mit vier Elementen abgebildet, im Scheitelbereich mit einer Schalendicke von 30 mm bestand das FE-Netz aus sechs Elementen (vergl. Abb. 7.4).

7.2.3.2 Netz „Statisch-mechanische Analyse“

Es gelang, den Volumenkörper durch 844.860 Elemente, ebenfalls hauptsächlich Hexaeder, mit 1.043.697 Knoten mit einer Kantenlänge von ebenfalls 5 mm zu vernetzen und ein symmetrisches Netz zu erhalten.

7.3 Ermittlung der optimalen Herstellgeometrie bezüglich Schwindens

Im nächsten Schritt wird die Herstellung der Rinne betrachtet. Dazu wurde das Schwindverhalten der Rinne simuliert. Hierzu wurde eine statisch-mechanische Ana-

lyse durchgeführt, in der eine Temperaturbelastung in Form einer thermischen Bedingung aufgebracht wurde.

In Kapitel 5 wurden mittels des Schwindkegelverfahrens die Schwindeigenschaften der für den Bau des Großdemonstrators verwendeten Mischung M1 ermittelt. Es zeigte sich, dass die ungünstigere der beiden untersuchten Proben einen Wert von 3,5 ‰ Volumenverringerng aufwies, was einen beträchtlichen Wert darstellt. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass etwa 95 % der Verformungen, verursacht durch Setzen, Entlüften und Schwinden, in den ersten 10 Stunden nach Beendigung des Mischvorgangs erfolgen (vergl. Abb. 5.11). Eine Überlagerung von Schwinden und Verformungen infolge weiterer direkter und indirekter Einwirkungen wurde aufgrund der verwendeten weichen Polystyrolschalung nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle mittels einer Finite-Elemente-Analyse die herzustellende Geometrie der Parabolrinne ermittelt, sodass die Rinne ihrer optimalen Geometrie folgt, sobald die infolge des Schwindens auftretenden Verformungen abgeschlossen sind.

7.3.1 Statisch-mechanische Analyse

Mit der statisch-mechanischen Analyse bietet ANSYS® die Möglichkeit, die Verformungen und Spannungen in Bauteilen in Abhängigkeit von äußeren, ruhenden Lasten zu ermitteln.

Alle für dieses Berechnungsmodul erforderlichen Materialparameter wurden bereits festgelegt.

Im nächsten Schritt wurden die Auflagerbedingungen definiert. Dazu wurden die Freiheitsgrade der Rinne in z-Richtung entlang ihrer Mittelachse in Schalenlängsrichtung sowie die einer Stirnseite in y-Richtung festgehalten (vergl. Abb. 7.5).

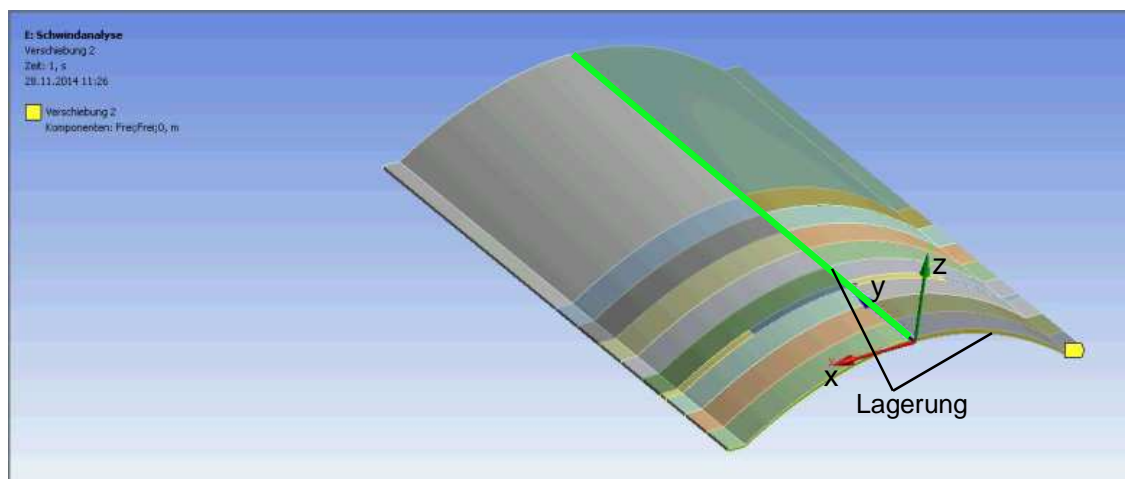


Abb. 7.5: Auflagerbedingungen der Parabolrinne für die Schwindberechnungen

Anders als die im Folgenden durchgeführten Berechnungen wurden aufgrund dieser Lagerung die Schwindbetrachtungen an der gesamten Rinne ohne Ausnutzung von Symmetriebedingungen durchgeführt.

An dem fertiggestellten vernetzten und gelagerten Modell der Parabolrinne wurde nun eine Temperatureinwirkung aufgebracht.

So konnte der Zustand der Parabolrinne in der Schalung simuliert werden. Diese wurde wie in Abb. 7.5 dargestellt modelliert, da sie mit der zu verspiegelnden Seite nach unten weisend betoniert wurde (vergl. Abb. 8.10).

Wie oben beschrieben trat bei der für den Großdemonstrator verwendeten Mischung M1 eine Volumenreduktion in Höhe von 3,5 ‰ auf.

Die Geometrieänderung des Bauteils wurde vereinfachend ersatzweise durch eine Temperaturbelastung modelliert. Der Gradient über den Querschnitt und der nichtlineare Feuchtegrad wurden nicht berücksichtigt.

Die Längenänderung Δl_S der Parabolrinne infolge dieser Einwirkung konnte daher unter Verwendung von

$$\Delta l_S = l \cdot \alpha_T \cdot \Delta T$$

mit l : Ausgangslänge des Bauteils [mm]

α_T : Wärmedehnzahl [1/K] (vergl. Tab. 4.28)

ΔT : Temperaturdifferenz [K]

abgebildet werden.

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde eine positive Wärmedehnung angesetzt. Auf diese Weise konnte die Geometrie der Parabolrinne ermittelt werden, nach welcher die Rinne herzustellen ist, damit sie nach Abschluss des Schwindens der idealen Parabelform entspricht.

Gesucht wird daher das aufzubringende positive ΔT , sodass eine Volumenvergrößerung von 3,5 ‰ resultiert:

$$\Delta T = \frac{\Delta l_S}{l \cdot \alpha_T} = \frac{3,5 \text{ mm}}{1000 \text{ mm} \cdot 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}} = 318,18 \text{ K}$$

Die Parabolrinne wurde also rechnerisch um 318,18 K erwärmt. Dabei wurde sie als masselos betrachtet, da ihre Auflagerung in der Praxis nicht mit den erforderlichen Auflagerbedingungen für die an dieser Stelle durchgeführten Schwindberechnungen in Übereinstimmung gebracht werden konnte.

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei diesem Berechnungsansatz um eine deutlich konservative Abschätzung handelt.

Untersuchungen hinsichtlich des Kriechens wurden von den Projektpartnern der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt (Müller 2013 b).

7.3.2 Berechnungsergebnis

Das Resultat des nun folgenden Arbeitsschritts ist die Geometrie der Rinne, welcher diese folgt, nachdem ihre Verformung infolge der aufgebrauchten thermischen Bedingung abgeschlossen ist. Diese Form ist herzustellen, um eine Reduktion des Inter-

ceptfaktors aufgrund von Initialverformungen zu eliminieren. Die herzustellende Geometrie ist in Abb. 7.6 dargestellt.

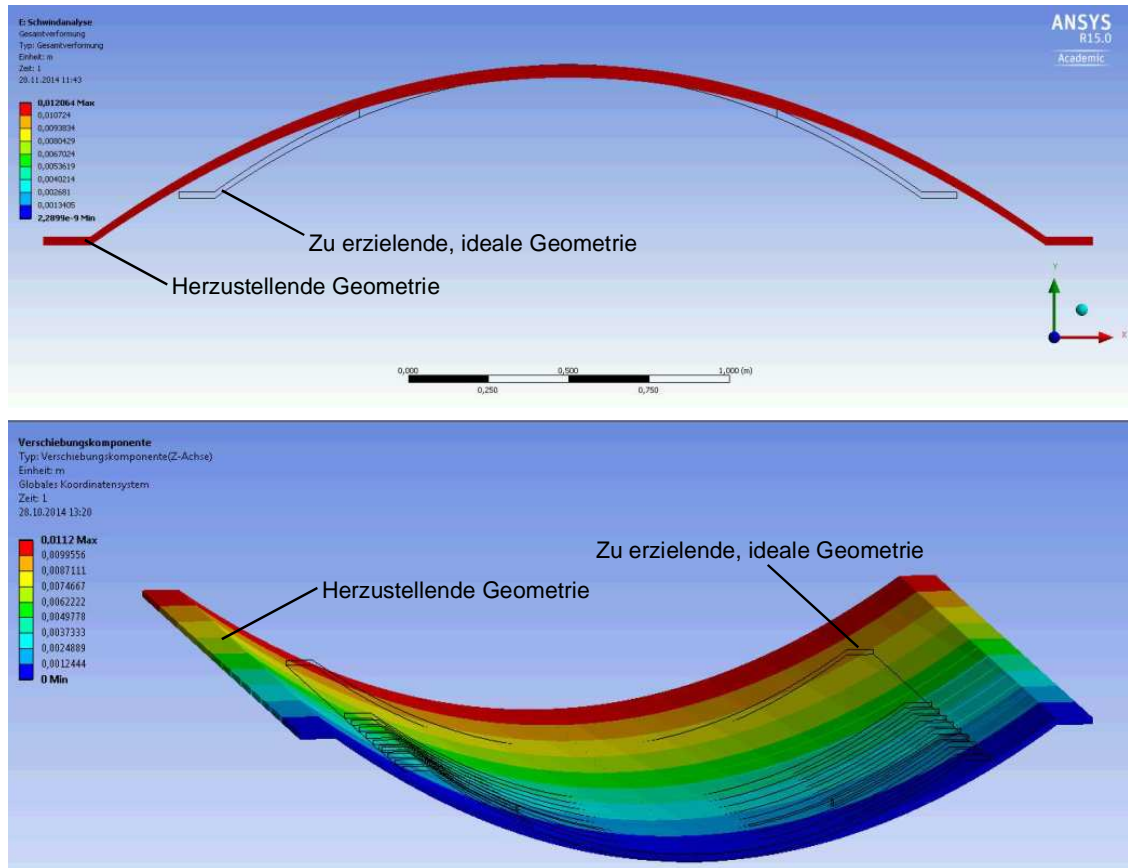


Abb. 7.6: Herzustellende und zu erzielende, ideale Geometrie der Parabolrinne (oben 140-fach, unten 100-fach überhöhte Darstellung)

Die Berechnungen wurden mit Hilfe zweier Plausibilitätskontrollen verifiziert. Für die Längenänderung Δl_S der Parabolrinne muss das mittels ANSYS[®] erzielte Ergebnis

$$\Delta l_S = 3200 \text{ mm} \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{K} \cdot 318,18 \text{ K} = 11,20 \text{ mm}$$

lauten.

Da dies der Fall war, wie in Abb. 7.7 veranschaulicht, können die Berechnungsergebnisse dieses Abschnitts als belastbar angesehen werden.

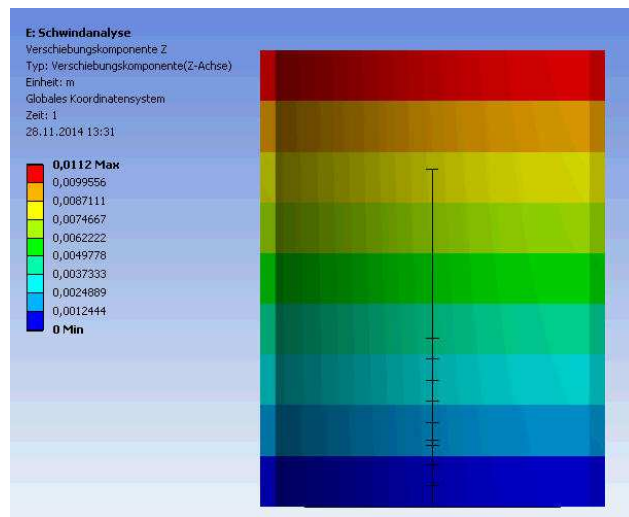


Abb. 7.7: Rechnerische Längenänderung der Parabolrinne infolge thermischer Bedingung

Des Weiteren mussten bei der als masselos angesetzten Parabolrinne und den oben gewählten Lagerungsbedingungen alle Spannungen gleich Null sein. Dies war ebenfalls gegeben. Der maximale Spannungswert von 0,001 MPa ist auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen (vergl. Abb. 7.8).

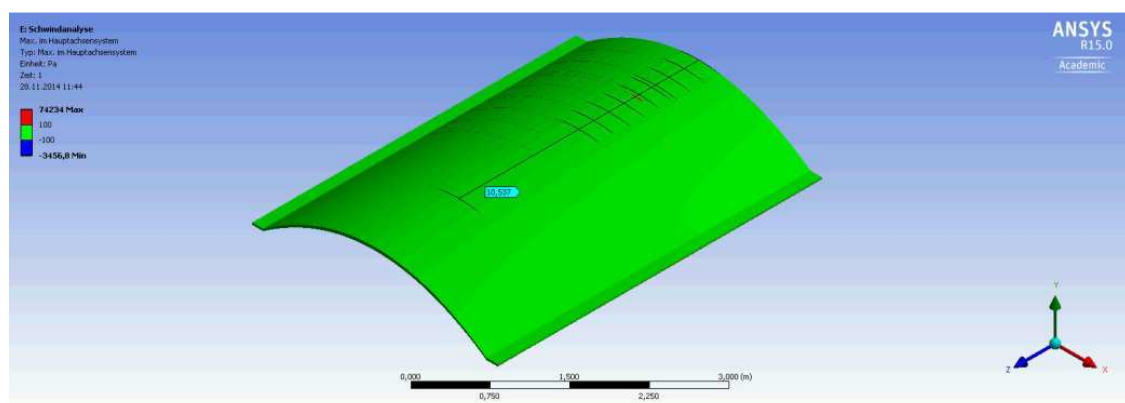


Abb. 7.8: Spannungsverteilung infolge thermischer Bedingung

7.4 Quantifizierung einer eventuellen Interceptfaktorverringering infolge des Lastfalls Temperatur

Im Folgenden wird der Interceptfaktor der Parabolrinne im Betriebszustand berechnet. Dazu wurde zuerst eine thermisch-transiente Analyse durchgeführt. Ziel dieser Analyse war es, eine Temperaturverteilung innerhalb der Parabolrinne bei einem bestimmten Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur zu erhalten. Diese Temperaturverteilung diente als Input für den nächsten Analyseschritt. In diesem wurde eine statisch-mechanische Analyse durchgeführt. Das Ergebnis dieses Schritts war die Verformungsfigur der Parabolrinne in zehn festgelegten Schnitten bei einem bestimmten Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur. Die Knotenkoordinaten dieser so generierten verformten Parabolrinne wurden in das in Kapitel 6 beschriebene Auswertungswerkzeug eingelesen und ausgewertet. Der jeweilige Interceptfaktor konnte auf diese Weise quantifiziert werden.

7.4.1 Simulierter Standort des Großdemonstrators

Nach *DLR 2014* befindet sich das größte europäische Testzentrum für Concentrated Solar Power (CSP) in der südostspanischen Provinz Almería in der Nähe der Wüste von Tabernas. Auf der 100 ha großen Plataforma Solar de Almería (PSA) werden seit 1980 verschiedene Hochtemperatur-Solartechnologien unter praxisnahen Einsatzbedingungen getestet und optimiert (vergl. Abb. 7.9).

Besitzer und Betreiber der PSA ist das spanische Zentrum für Energie, Umweltstudien und Technologie CIEMAT. Dieses ist ein langjähriger Kooperationspartner des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).



Abb. 7.9: Plataforma Solar de Almería
(http://www.evwind.com/wp-content/uploads/2013/04/plataforma_solar_almeria.jpg,
zuletzt zugegriffen am 17.12.2014)

Der Großdemonstrator wurde für diesen Standort simuliert. Hierbei konnte auf vom DLR freundlicherweise zur Verfügung gestellte meteorologische Daten zugegriffen werden.

7.4.2 Meteorologische Daten

Vom DLR wurden Daten für den Zeitraum vom 01.01.2009, 00:01 Uhr bis zum 01.01.2010, 00:00 Uhr zur Verfügung gestellt. Die Messrate bei der Datenaufzeichnung betrug 0,0167 Hz, also ein Messwert pro Minute.

Die Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit im Stundentakt ausgewertet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurde ausschließlich die Umgebungslufttemperatur betrachtet. Für jeden Tag des Jahres 2009 wurde die maximale Umgebungslufttemperatur ermittelt, um den jeweiligen Interceptfaktor wirklichkeitsnah ermitteln zu können. Dieser wird infolge von temperaturbedingten Verformungen der Parabolrinne reduziert.

Der heißeste und damit maßgebende Tag in 2009 war der 22.07.2009 mit einer Maximaltemperatur von 41,30 °C um 17 Uhr.

Für die Betonage der Parabolrinne wurde eine Temperatur von 20 °C angesetzt, die als Ausgangstemperatur in die später mittels ANSYS® durchgeführte thermisch-transiente Analyse einging.

Anschließend wurde der Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur dieses als für den Lastfall Temperatur maßgebenden Tages aufgestellt und in Form einer Wertetabelle in ANSYS® importiert (vergl. Abb. 7.10).

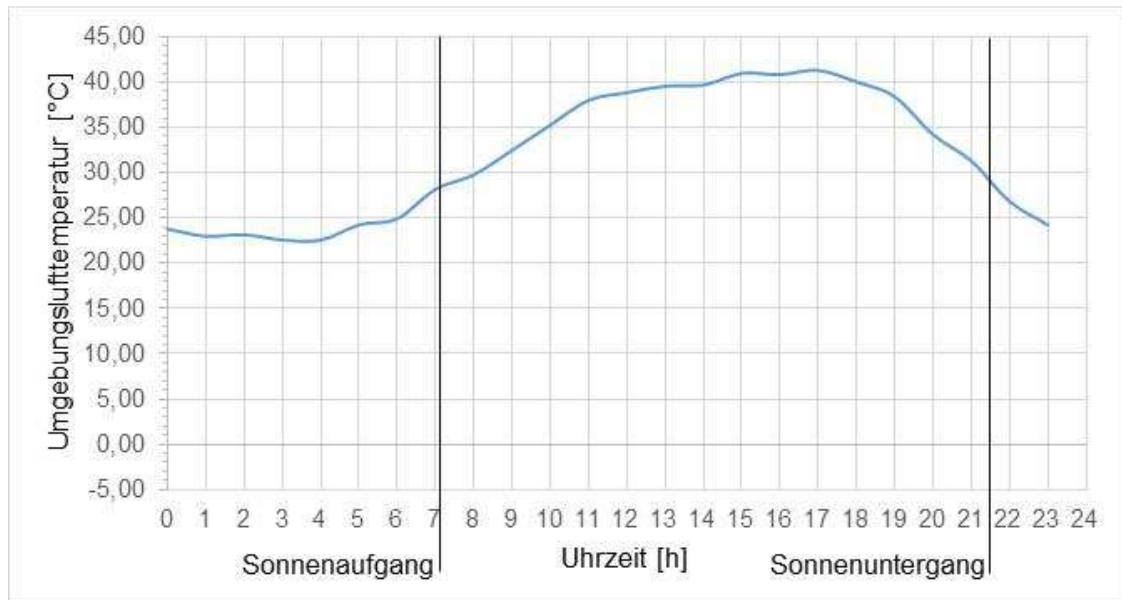


Abb. 7.10: Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur am 22.07.2009

Es wurde betrachtet, wie sich die Rinne verformt und damit einhergehend, wie sich der Interceptfaktor verändert, wenn die gesamte Betonrinne eine Anfangstemperatur von 20 °C aufweist und dann dem in Abb. 7.10 dargestellten Verlauf der Umgebungslufttemperatur ausgesetzt wird.

Bei einer solchen Betrachtung ist es erforderlich, einen eingeschwungenen Schönwetterzustand zu simulieren, sodass sich der Tagesverlauf der Betonkerntemperatur am einen Tag nicht mehr von dem zum vorhergehenden oder darauffolgenden Tag unterscheidet. Aufgrund der enormen Schlankheit der Parabolrinne war es ausreichend, für die Berechnung als Startzeit zwei Stunden vor dem betrachteten Zeitpunkt anzusetzen.

Sonnenaufgang war am 22.07.2009 um 07:06 Uhr, Sonnenuntergang um 21:26 Uhr. Aus diesem Grund wurde nachfolgend der Interceptfaktor im relevanten Zeitraum von 07:00 Uhr bis 21:00 Uhr ermittelt.

7.4.3 Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur Erzeugung der verformten Geometrie

Zur Ermittlung der verformten Geometrie der Parabolrinne des Großdemonstrators unter dem Lastfall Temperatur wurde ebenfalls die Software ANSYS® verwendet.

Im Berechnungsmodul „Thermisch-Transiente Analyse“ wurde die Temperaturverteilung innerhalb der Parabolrinne infolge des oben dargestellten Tagesverlaufs der

Umgebungslufttemperatur ermittelt. Diese wurde anschließend in das Modul „Statisch-Mechanische Analyse“ exportiert, wo die dazugehörige Verformungsfigur generiert wurde.

Da die Rinne symmetrisch ist, konnten alle weiteren Analysen an einer an der halben Längsachse geteilten Parabolrinne durchgeführt werden.

7.4.3.1 Thermisch-transiente Analyse

Mittels einer in ANSYS® durchgeführten thermisch-transienten Analyse kann der zeitliche Verlauf eines Temperaturfeldes abgebildet werden.

Zuerst waren im Modul thermisch-transiente Analyse die erforderlichen Materialparameter als Eingangsgrößen für die Simulation festzulegen.

Danach wurde als Randbedingung der in Abb. 7.10 dargestellte Tagesverlauf der Umgebungsluft aufgebracht. Strahlungseinflüsse sind dabei nicht enthalten. Direkte Sonneneinstrahlung fällt im Regelbetrieb nicht an.

Auflagerbedingungen, wie diese beispielsweise für eine statisch-mechanische Analyse festgelegt werden müssen, existieren in diesem Berechnungsmodul nicht.

Das Ergebnis dieser ersten Analyse war eine rechnerische Temperaturverteilung in der Parabolrinne über den gesamten Tagesverlauf. In Abb. 7.11 wird exemplarisch der maßgebende Zustand um 18 Uhr gezeigt.

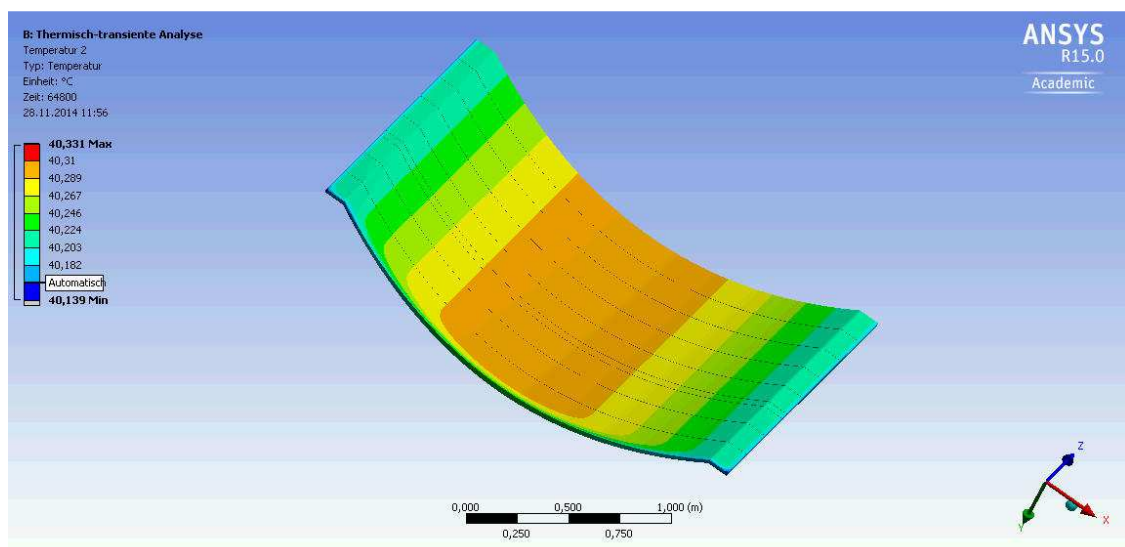


Abb. 7.11: Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Innenseite der Parabolrinne auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) am 22.07.2009 um 18 Uhr, nach einem Tag, Anfangstemperatur 20°C

7.4.3.2 Statisch-mechanische Analyse

Mit der statisch-mechanischen Analyse bietet ANSYS® die Möglichkeit, die Verformungen und Spannungen in Bauteilen in Abhängigkeit von äußeren, ruhenden Lasten zu ermitteln.

Im Berechnungsmodul statisch-mechanische Analyse waren zunächst alle erforderlichen Materialparameter einzugeben.

Anschließend wurden die Auflagerbedingungen definiert. Dazu wurden alle Freiheitsgrade der beiden oben erwähnten aufgesprägten Flächen festgehalten (vergl. Abb. 7.12).

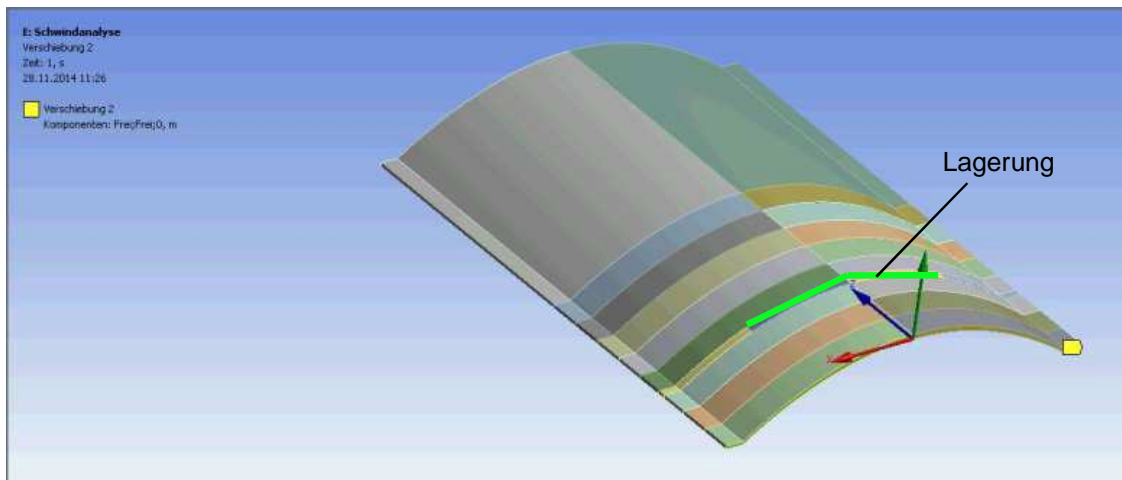


Abb. 7.12: Auflagerbedingungen der Parabolrinne für die Temperaturberechnungen

An dem fertiggestellten vernetzten und gelagerten Modell der Parabolrinne wurden als äußere Belastungen sowohl ihre Eigenlast als auch die zuvor ermittelte Temperaturverteilung derselben aufgebracht.

Das Berechnungsergebnis ist zum einen die Verformungsfigur der Rinne, zum anderen die Spannungsverteilung im Bauteil (vergl. Abb. 7.13).

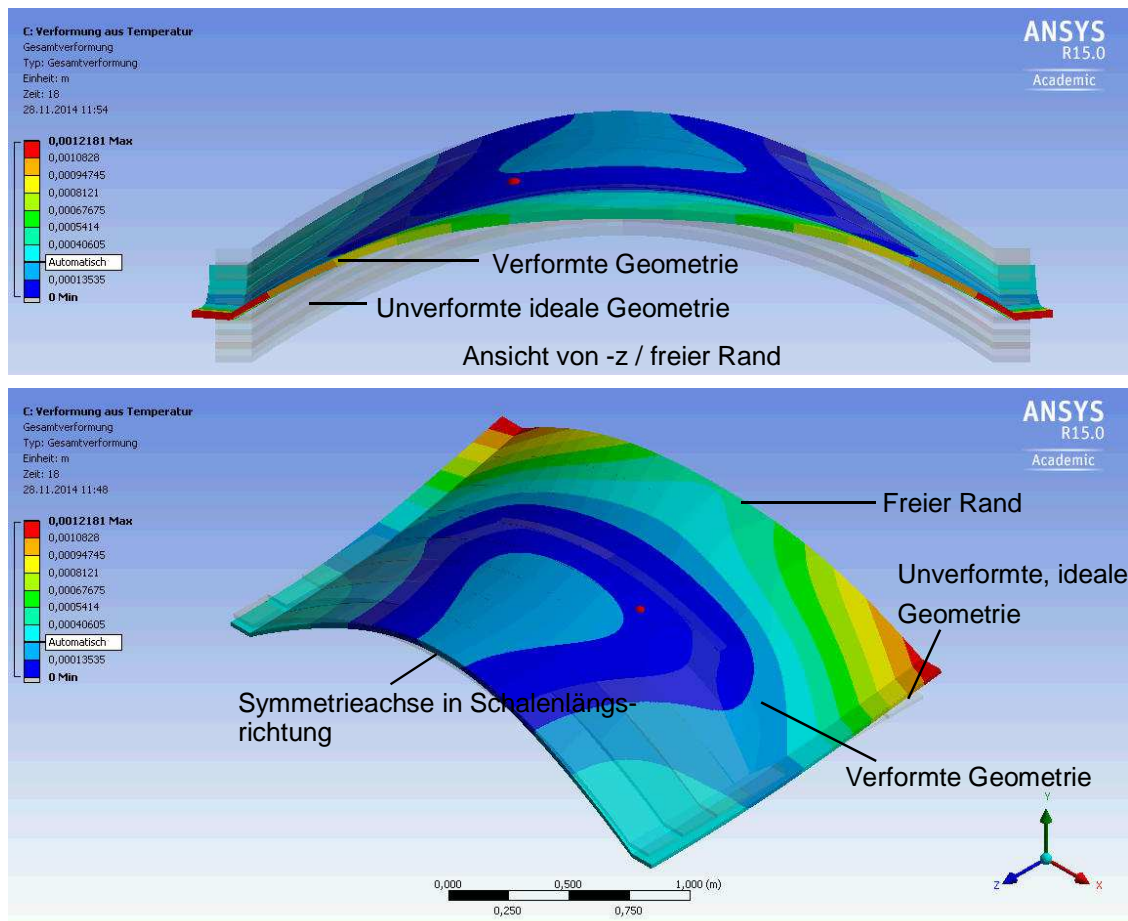


Abb. 7.13: Gesamtverformung der Parabolrinne auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) am 22.07.2009 um 18 Uhr, nach 1 Tag, Anfangstemperatur 20°C (140-fach überhöht dargestellt)

Der Interceptfaktor der Parabolrinne in diesem und in 14 weiteren Verformungszuständen wird nachfolgend ermittelt.

Die infolge von Eigenlast und indirekten Einwirkungen auftretenden Biegezugspannungen sind vernachlässigbar und liegen weit unter den in Kapitel 4 ermittelten Werkstoffkennwerten von Nanodur[®]-Beton von im ungünstigsten Fall 12,3 N/mm² (vergl. Abb. 7.14).

Betrachtungen hinsichtlich der Torsionssteifigkeit wurden nicht berücksichtigt. Die Entwicklung in der Praxis zielt auf Parabolrinnen mit zunehmenden Aperturweiten und größeren Kollektorstranglängen zur Reduktion der benötigten Antriebseinheiten. Verdrehungseffekte gewinnen dabei an Bedeutung, sodass Untersuchungen hierzu erforderlich sind.

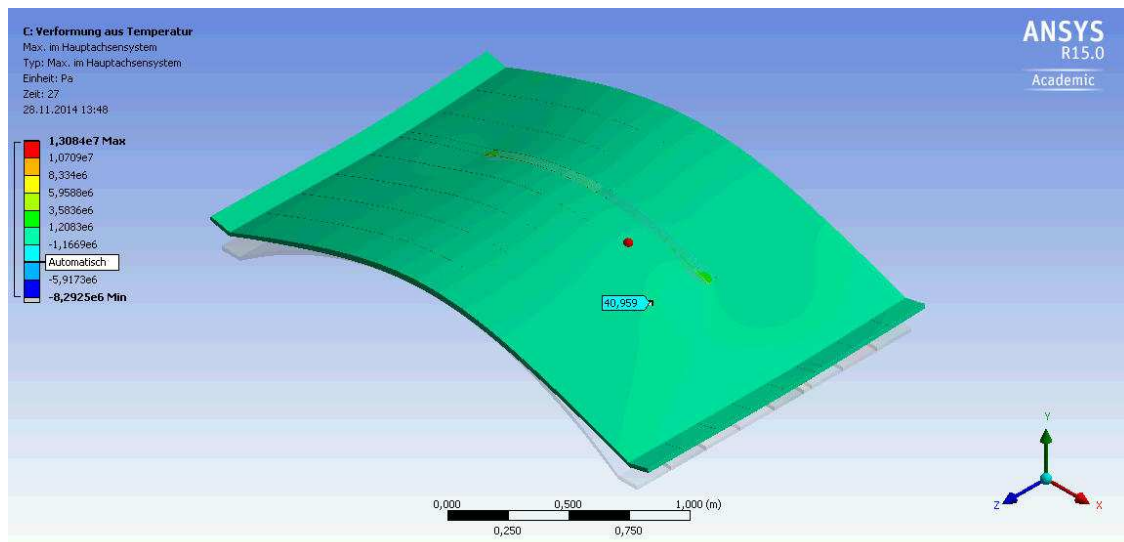


Abb. 7.14: Rechnerische Spannungsverteilung der Parabolrinne in den Hauptachsen am 22.07.2009 um 18 Uhr auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) (410-fach überhöhte Darstellung)

Um die ursprüngliche Fragestellung der Quantifizierung der Verringerung des Interceptfaktors des Großdemonstrators unter den Lastfällen Eigenlast und Temperatur beantworten zu können, wurden aus den zuvor erhaltenen Berechnungsergebnissen die Knotenkoordinaten der Oberfläche der verformten Parabolrinne in den zehn festgelegten Schnitten in x- und in y-Richtung extrahiert.

Diese Knotenkoordinaten wurden für die weiteren Berechnungen tabellarisch in das in Kapitel 6 mittels Microsoft Excel generierte Auswertungswerkzeug exportiert, welches den Interceptfaktor der verformten Parabolrinne berechnete und ausgab.

7.4.4 Ermittlung des Interceptfaktors

Nach Durchführung der beschriebenen Finite-Elemente-Analyse lag die Verformungsfigur der Parabolrinne bei einem bestimmten Tagesverlauf der Umgebungslufttemperatur zu jedem beliebigen Zeitpunkt des berechneten Zeitraums vor. So konnte eine Aussage über die Verschiebung jedes Knotens auf der Oberfläche in den zehn gewählten Schnitten getroffen werden.

Das in diesem Abschnitt verfolgte Ziel ist es, eine Aussage über die damit einhergehende eventuelle Reduktion des Interceptfaktors treffen zu können.

Dazu wurde der Interceptfaktor IF des Großdemonstrators unter Anwendung der beiden in Kapitel 6 entwickelten Berechnungsverfahren bestimmt.

Hierzu wurde im Zeitraum von 07:00 Uhr bis 21:00 Uhr, also von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang (vergl. Abb. 7.10), alle 60 Minuten der Interceptfaktor der Parabolrinne anhand der Auswertung der 10 Schnitte berechnet.

Exemplarisch ist dies für 18:00 Uhr in der nachfolgenden Tab. 7.2 dargestellt. Zu dieser Uhrzeit wurde der geringste Interceptfaktor ermittelt (vergl. Tab. 7.3).

Tab. 7.2: Interceptfaktorbestimmung 18:00 Uhr

		Variante 1	Variante 2
Teil-IF	Schnitt 01	98,74477	98,32636
	Schnitt 02	98,74477	100,00000
	Schnitt 03	99,16318	100,00000
	Schnitt 04	99,16318	98,74477
	Schnitt 05	99,16318	100,00000
	Schnitt 06	98,32636	98,74477
	Schnitt 07	98,32636	98,74477
	Schnitt 08	99,16318	100,00000
	Schnitt 09	99,16318	100,00000
	Schnitt 10	99,16318	100,00000
IF		98,88337	99,50314

Um ausgehend von den mittels ANSYS® erzeugten Ergebnissen zu einer Aussage bezüglich des mit diesen verknüpften Interceptfaktors zu gelangen waren zahlreiche weitere Arbeitsschritte erforderlich. So wurden zu den 15 berechneten Zeitpunkten im Zeitraum von 07:00 Uhr bis 21:00 Uhr die x- sowie die y-Komponenten der Knoten des Finite-Elemente-Netzes der verformten Parabolrinnengeometrie in allen zehn Schnitten in Form von Exceltabellen exportiert, insgesamt also 300 Tabellen. Diese wurden in 150 neue Dateien übertragen, in welchen dann in den einzelnen Schnitten zu den unterschiedlichen betrachteten Zeitpunkten mittels des in Kapitel 6 entwickelten Algorithmus der jeweilige Interceptfaktor ermittelt wurde. Diese Teilinterceptfaktoren wurden wiederum in 15 weiteren Exceldateien zusammengefasst, welche den Gesamtinterceptfaktor der Parabolrinne in Zeitschritten von 60 Minuten berechneten.

In Summe waren also 465 einzelne Exceldateien zu handhaben. Für diesen Arbeitsschritt wurde ein Algorithmus in Matlab R2014a programmiert und angewendet. Das Ergebnis ist in der nachfolgenden Tab. 7.3 dargestellt.

Tab. 7.3: Interceptfaktoren über den Tagesverlauf

Uhrzeit	IF [%]	
	nach Variante 1	nach Variante 2
07:00	99,13703	99,52929
08:00	99,16318	99,52929
09:00	99,16318	99,52929
10:00	99,06250	99,52929
11:00	99,06250	99,52929
12:00	99,03635	99,52929
13:00	99,13703	99,52929
14:00	99,13703	99,52929
15:00	99,13703	99,52929
16:00	98,98405	99,52929
17:00	99,03635	99,50314
18:00	98,88337	99,50314
19:00	99,03635	99,52929
20:00	99,03635	99,52929
21:00	99,03635	99,52929

Durch Mittelwertbildung aus den 15 in Zeitschritten von 60 Minuten bestimmten Interceptfaktoren konnte anschließend der Tagesinterceptfaktor für diesen maßgebenden Tag berechnet werden.

Der über den Tagesverlauf gemittelte Interceptfaktor beträgt somit $IF = 99,06991\%$ (berechnet nach Variante 1), beziehungsweise $IF = 99,52580\%$ (berechnet nach Variante 2).

Als Fazit kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass es bei dem im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Großdemonstrator rechnerisch beziehungsweise nach Simulation nur zu einer minimalen Verringerung des Interceptfaktors infolge der am maßgebenden Tag auf der Plataforma Solar de Almería herrschenden Umgebungsbedingungen kam.

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, erreichen Kollektoren dieser Größe nach Angaben des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) bei derzeit bestehenden Systemen mindestens einen Interceptfaktor von 95 bis 99 %.

Technisch ist eine präzise Herstellung der diesen Berechnungen zugrunde liegenden Geometrie durchaus machbar. Voraussetzung sind entsprechende finanzielle Mittel für die Schalung, wie diese für eine Serienproduktion wirtschaftlich vertretbar sind. Erfolgt eine solche präzise Fertigung, kann der im Rahmen dieser Arbeit hergestellte Großdemonstrator demnach hinsichtlich seiner in Form des Interceptfaktors beurteil-

ten Leistungsfähigkeit durchaus mit derzeit bestehenden konventionellen Systemen konkurrieren.

7.5 Mögliches Fertigungsprinzip

Resultierend aus den im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen und Überlegungen wird in diesem Abschnitt ein erster Vorschlag für ein mögliches Fertigungsverfahren für die Serienproduktion von Parabolrinnen aus Nanodur[®]-Beton vorgeschlagen, welches vor diesem Hintergrund aussichtsreich erscheint.

Dieses Verfahren gliedert sich in drei Schritte (vergl. Abb. 7.15):

Fertigungsschritt 1:

Die Bewehrung wird ungebogen mit Abstandhaltern in den Schalautomaten eingebracht und durch Schließen des Schalungsdeckels in die erforderliche Form gebracht. Anschließend wird der Beton eingefüllt.

Fertigungsschritt 2:

Aufgrund der zu erzielenden Formstabilität und Maßgenauigkeit ist eine große Steifigkeit der Schalung erforderlich. Diese stellt eine Verformungsbehinderung dar. Nachdem der Beton eine ausreichende Standfestigkeit erreicht hat wird der Schalungsdeckel entfernt. So werden Zwängungen im Bauteil infolge Schwindens verringert. Um ein Aufschüsseln der Parabolrinnen infolge ungleichmäßigen Schwindens zu reduzieren werden diese am Schalungsunterteil fixiert.

Fertigungsschritt 3:

Zur Reduzierung der Verformungen infolge Schwindens erfolgt eine Wärmebehandlung des Bauteils durch Aufheizen des Schalungsunterteils. Auf diesem verbleibt die Rinne für insgesamt 10 h, da nach dieser Zeit etwa 95 % der durch Schwinden verursachten Verformungen eingetreten sind (vergl. Kapitel 5.1.3). Dabei ist zu beachten, dass die zu diesem Zeitpunkt vorhandene Frühfestigkeit des Betons nicht überschritten wird. Dies ist durch eine entsprechende Abhebekonstruktion sicherzustellen.

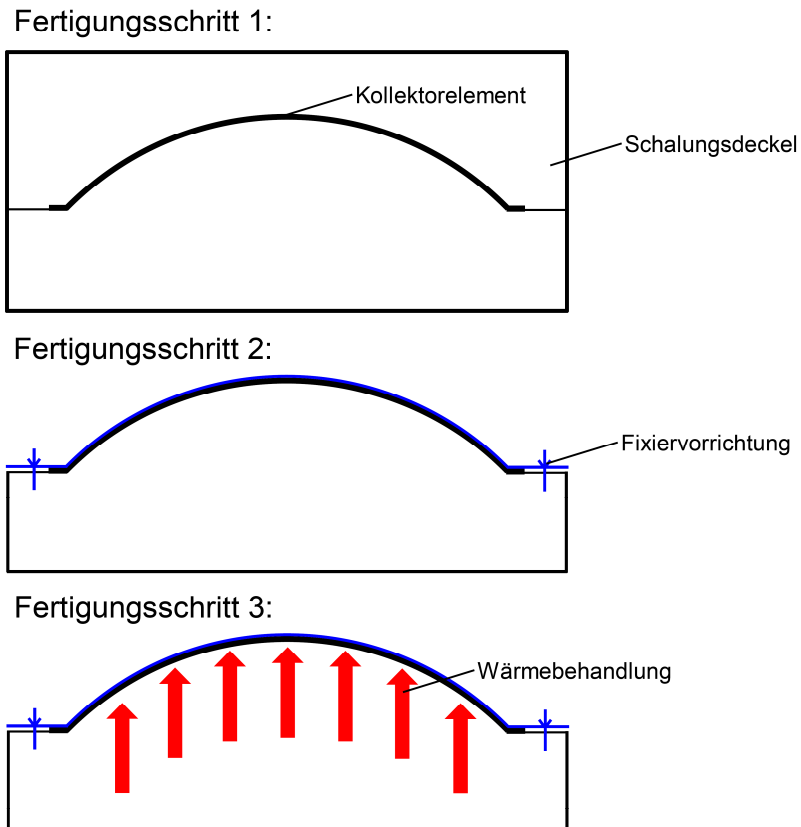


Abb. 7.15: Mögliches Fertigungsverfahren zur Serienproduktion von Parabolrinnen in Betonbauweise

Aufgrund der aufsteigenden Luftblasen und der damit verbundenen Porosität der Oberfläche werden die Parabolrinnen mit der Öffnung nach unten weisend betoniert.

Nach den in Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Erstarrungszeit muss zwar nur eine Schalungsverweildauer von zwei bis drei Stunden unterstellt werden. Nach dieser Zeit kann der Schalungsdeckel geöffnet werden. Zur Reduzierung von Verformungen infolge ungleichmäßigen Schwindens ist es jedoch vorgesehen, die Parabolrinnen über einen Zeitraum von zehn Stunden einer Wärmebehandlung zu unterziehen.

8 Entwurf und bauliche Realisierung eines Großdemonstrators

Im Rahmen dieser Arbeit konnte im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern die Herstellung eines Großdemonstrators erfolgreich realisiert werden.

Dieses Kapitel hat die dazu erforderlichen Vorüberlegungen sowie die zu bewältigenden herstellungstechnischen Herausforderungen zum Inhalt. Die einzelnen Komponenten des Demonstrators sowie alle durchgeführten Herstellungsschritte werden ausführlich beschrieben.

8.1 Planung

Das in Kapitel 3 generierte CAD-Modell konnte sowohl für die im vorhergehenden Kapitel 7 durchgeführten Berechnungen des Großdemonstrators als auch für dessen bauliche Realisierung verwendet werden.

Für die bauliche Umsetzung musste allerdings zuerst noch die Detailplanung des Auflagerungskonzepts erfolgen (vergl. Abb. 8.1).

Es wurde das in *Weißbach 2012* beschriebene Prinzip umgesetzt, das den Bedarf an kinetischer Energie zur Rotation der Parabolrinne gegenüber herkömmlichen Konzepten stark reduziert, da der Schwerpunkt der Höhe immer in der gleichen Höhe verbleibt.

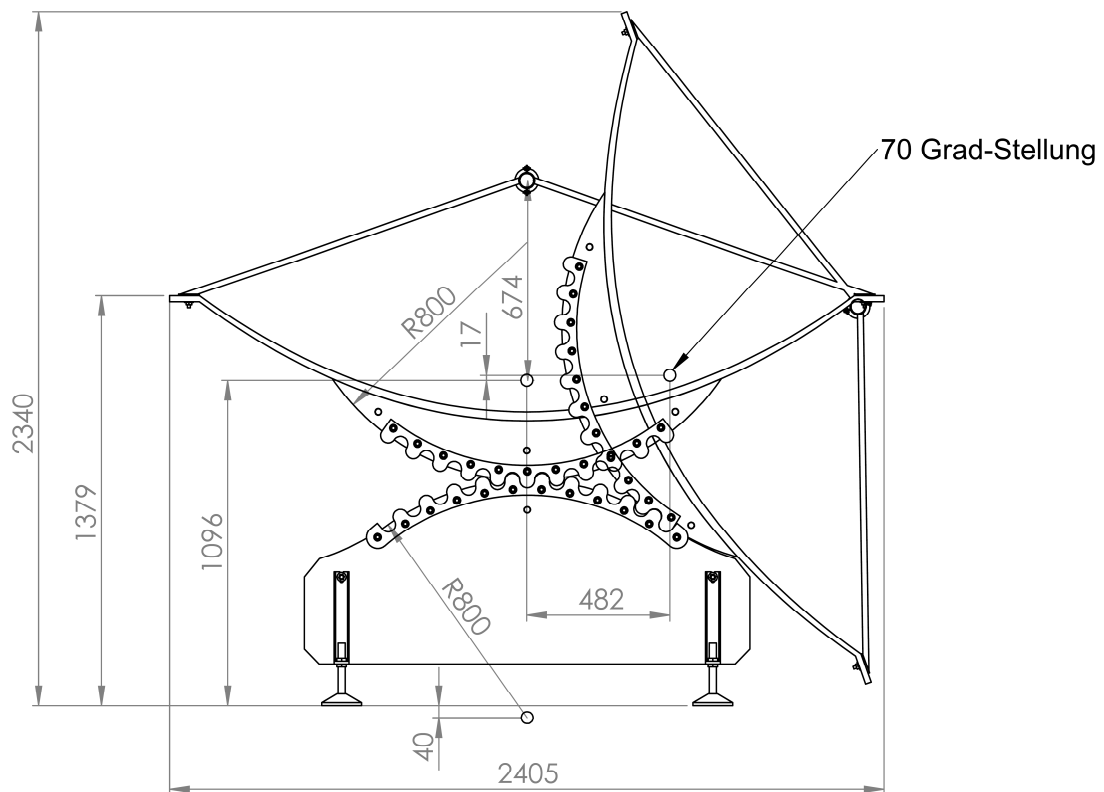


Abb. 8.1: Geometrieplanung des Auflagerungskonzepts des Demonstrators (Einheiten in [mm]), (Zeichnung: Firma solarsolid)

Die Visualisierung des Großdemonstrators in der Planungsphase erfolgte mittels der Konstruktionssoftware solidworks (vergl. Abb. 8.2).

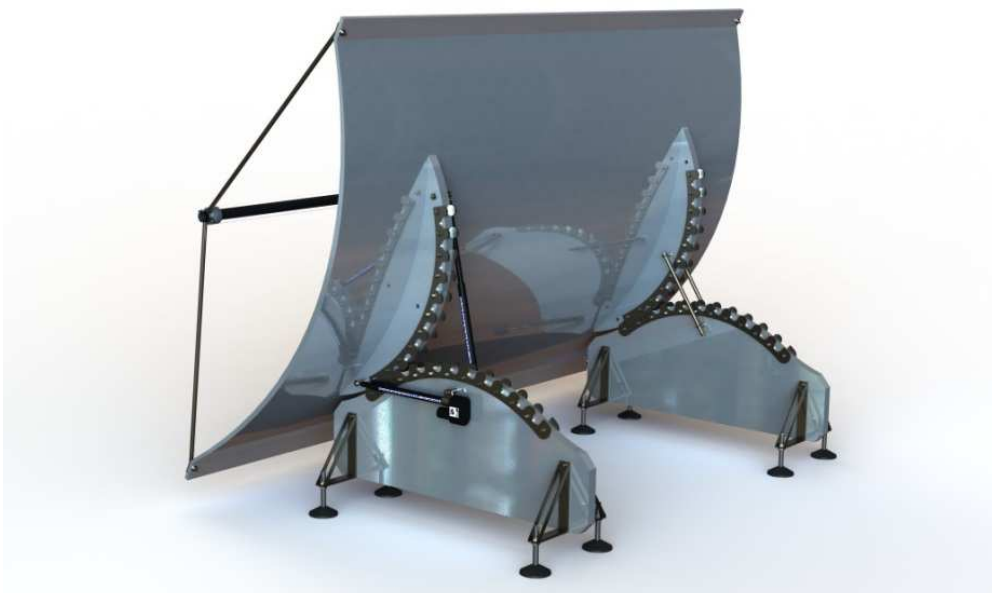


Abb. 8.2: Computeranimation des Großdemonstrators (Animation: Firma solarsolid)

8.2 Bauliche Umsetzung

Der Bauablauf sah wie folgt aus: Im ersten Schritt wurde die Auflagerkonstruktion hergestellt. Danach erfolgte die Betonage der Parabolrinne. Nachdem die beiden Auflagerrippen mit der Rinne mittels einer Klebefuge verbunden wurden, erfolgte die Montage der Rinne auf ihren beiden Auflagern. In diesem Bauzustand konnten die Spiegelelemente aufgebracht werden. Anschließend wurde der Großdemonstrator wieder demontiert, um zu seinem endgültigen Standort auf dem Campus der TU Kaiserslautern transportiert werden zu können.

Die einzelnen Komponenten des Kollektorelements sind – bis auf die Spiegelbleche – in Abb. 8.3 dargestellt.

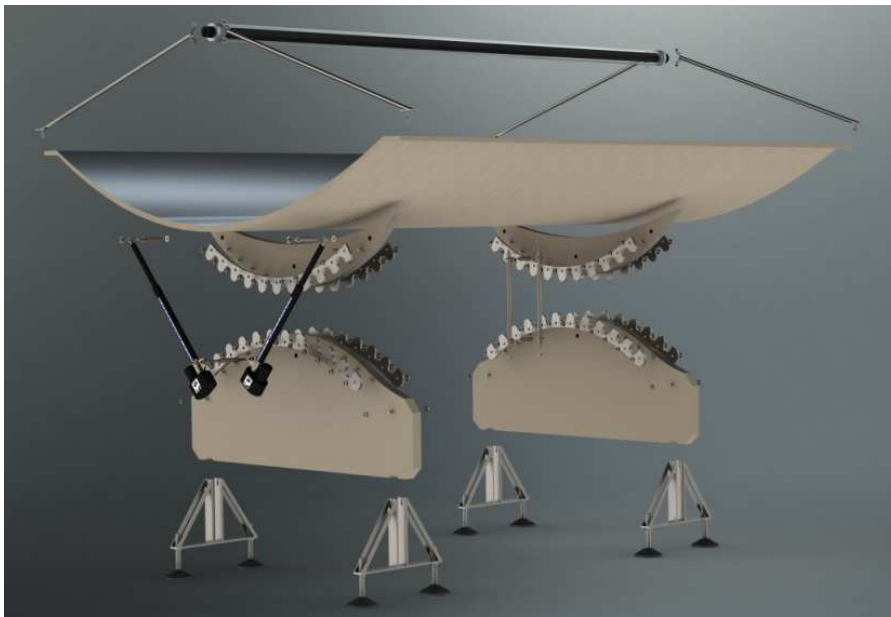


Abb. 8.3: Komponenten des Großdemonstrators (ohne Spiegelbleche)
(Animation: Firma solarsolid)

Sowohl für die Herstellung der Parabolrinne als auch für die der Auflagerkonstruktion wurde als Werkstoff der im Rahmen dieser Arbeit bereits ausführlich beschriebene Nanodur[®]-Beton M1 (vergl. Kapitel 4) verwendet.

8.2.1 Auflager und Rippen

8.2.1.1 Bewehrung

Es wurde konstruktiv eine konventionelle Betonstahlrobustheitsbewehrung verwendet, die ein Gesamtversagen der Auflager infolge einer unplanmäßigen Einwirkung, beispielsweise einer Stoßbeanspruchung während des Transports, verhindern (vergl. Abb. 8.4, links).

8.2.1.2 Schalung und Betonage

Die Schalung für die Betonteile der Auflagerkonstruktion wurde CAD-gesteuert aus Stahlblech mittels Laserstrahl ausgeschnitten.

Mit der Schalung wurde gleichzeitig eine komplette Auflagerkonstruktion, bestehend aus einer Rippe (1) und einem Unterteil (2) (vergl. Abb. 8.5, rechts), betoniert.



Abb. 8.4: Bewehrung, Schalung und Betonage der Auflagerkonstruktion

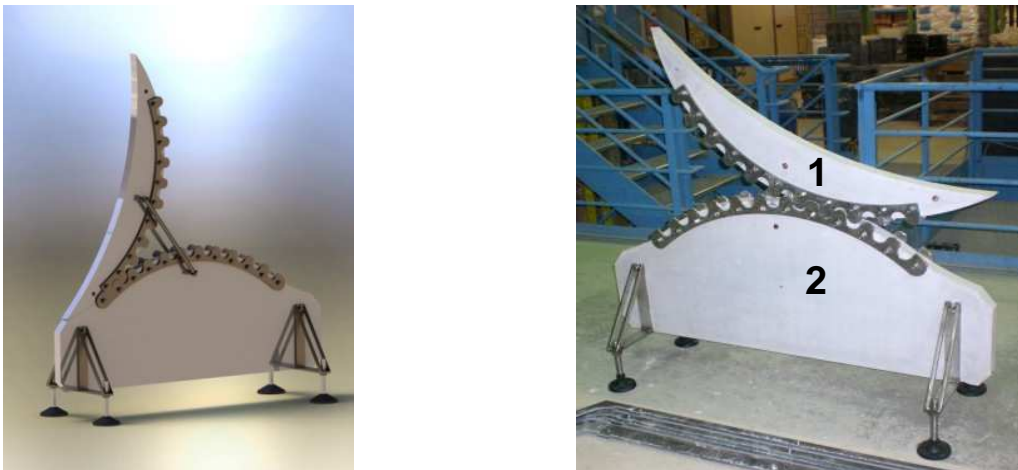


Abb. 8.5: links: Computeranimation der Auflagerkonstruktion (Animation: Firma solarsolid), rechts: fertiggestelltes Auflager, (1) Rippe, (2) Unterteil

8.2.2 Parabolrinne

8.2.2.1 Bewehrung

Der hier vorgestellte Demonstrator wurde so dimensioniert, dass er stets im Zustand I, also ungerissen, bleibt. Eine Bewehrung der Schale ist deshalb aus statischen Gesichtspunkten nicht erforderlich. So wurde der Demonstrator rein konstruktiv mit einer Betonstahlmatte Q188A bewehrt. Der Grund für die Verwendung einer Mattenbewehrung ist die vergleichsweise einfache Handhabung derselben für das Bewehren eines gekrümmten Bauteils.

In Kapitel 4.5.7 wurde nachgewiesen, dass vom Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit in Form des Karbonatisierungswiderstands nichts gegen die ausgeführte Betondeckung von nur vier Millimetern auf beiden Seiten spricht.

Für die Lagesicherung der Betonstahlmatte in der Schalung wurden Abstandhalter benötigt. Zwar wurde die Matte vor dem Einlegen in die Schalung bestmöglich in die

erforderliche Form gebogen, aufgrund der Elastizität von Stahl traten jedoch Rückstellkräfte auf, sodass auf beiden Seiten der Matte Abstandhalter eingebaut werden mussten. Zuerst wurden diese aus PVC Rundstabmaterial mit einem Durchmesser von 20 mm und 30 mm gefertigt und auf die Stahlstäbe geklemmt. Diese Lösung musste verworfen werden, da die Kunststoffteile nicht elastisch genug waren und zerbrachen. Die letztendlich realisierte Variante war die Fertigung von aufklembaren Abstandhaltern aus Kunststoffrohren auf der Drehbank. Diese Ausführungsart des Vorbiegens der Bewehrungsmatte und der Kunststoffabstandhalter wurde für die verwendete weiche, folienbeschichtete Polystyrolschalung gewählt (vergl. Abb. 8.6).



Abb. 8.6: Bewehrung der Parabolrinne und Abstandhalter

Bei industrieller Serienfertigung mittels einer entsprechend widerstandsfähigen Stahlschalung ist es durchaus vorstellbar, die Bewehrung ohne diese vorzubiegen in die Schalung einzulegen und durch Schließen des Schalungsdeckels in die gewünschte Form zu bringen. Entsprechende Abstandhalter für diesen Zweck wären zu entwickeln.

Zur Wahl der Bewehrung lässt sich ergänzen, dass es in der heutzutage verfügbaren Bewehrungstechnik zahlreiche Alternativen zur konventionellen Stabstahlbewehrung gibt, die durchaus infrage kommen würden. Zu nennen sind beispielsweise metallische Mikrostabmatten, die auch in rostfreiem Stahl lieferbar sind (*Ducon 2009*, *Hauser 1999 a*, *Hauser 1999 b* und *Hauser 1999 c*), oder Bewehrungselemente aus karbonfaser- oder glasfaserverstärkten Kunststoffen (*Hegger 2012* und *Curbach 2012*). Ihre Verwendung in diesem Anwendungsfall in Kombination mit dem hefeteigartigen Nanodur[®]-Beton schien jedoch unter herstellungstechnischen Gesichtspunkten ungeeignet und wurde daher verworfen.

8.2.2.2 Einfluss der Schalung auf die Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme

Während in Kapitel 4 dieser Arbeit der Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme von Nanodur[®]-Beton unter adiabatischen Bedingungen betrachtet wurde, wird im Folgenden der Einfluss des Schalungsmaterials auf diesen untersucht.

Wie zuvor beschrieben ist für die Serienfertigung von Parabolrinnen aus Beton eine hochpräzise Stahlschalung notwendig. Für die Herstellung des Großdemonstrators im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern im Rahmen des Forschungsvorhabens ist die Verwendung einer solchen Schalung aus Stahl aus Kostengründen nicht realisierbar. Nach *Durcrete GmbH 2011 b* erfolgt die Verdichtung des Nanodur[®]-Betons ohne Rütteln. Dadurch ist es möglich, leichte, preiswerte und langlebige Schalungen zu verwenden, beispielsweise auch aus Kunststoff. Als kostengünstiges Schalungsmaterial wurde daher Polystyrol verwendet.

Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss des verwendeten Schalungsmaterials auf die Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme von Nanodur[®]-Beton zu untersuchen. Die in Kapitel 4 genauer beschriebene Nanodur[®]-Betonmischung M1 wurde für den Bau des Großdemonstrators verwendet. Ihr Temperaturverhalten infolge Hydratationswärme wurde daher in einer Kunststoffschalung mit einer Wandstärke von 25 mm untersucht. Um welchen Kunststoff es sich handelt, war vom Hersteller nicht zu erfahren. Die Mischungen M2 und M3 wurden hingegen in Zylinderschalungen mit einer Wandstärke von 10 mm aus einem Stahl S355 gegeben. Der Grund hierfür ist, dass diese beiden Mischungen speziell für die Serienproduktion von Parabolrinnen aus Beton für ein großmaßstäbliches Kraftwerk unter Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers zur Minimierung der Schalfristen entwickelt wurden. Bei einer dabei erforderlich werdenden Schalung würde Stahl als Material Verwendung finden.

In Tab. 8.1 ist eine Übersicht der durchgeführten Versuche gegeben.

Tab. 8.1: Versuchsübersicht Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme über die Zeit von M1, M2 und M3 bei unterschiedlichen Schalungsmaterialien

Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme bei unterschiedlichen Schalungsmaterialien	Mischung	Schalungsmaterial
	M1	Kunststoff
	M2	Stahl
	M3	Stahl

Die Versuchsreihen wurden analog zu den in Abschnitt 4.5.3 beschriebenen Versuchsreihen durchgeführt: Bei jeder Versuchsreihe wurde Nanodur[®]-Frischbeton in drei zur Herstellung von Zylindern mit den Abmessungen 150 mm x 300 mm verwendeten Schalungen (Fassungsvermögen 13,3 kg) eingefüllt (vergl. Abb. 8.7). In allen drei Behältern befand sich jeweils ein Thermdraht im Volumenmittelpunkt des Betons. Mittels eines Datenloggers wurde so der Temperaturgang des hydratisierenden Betons erfasst. Die Messung begann unmittelbar nach dem Beenden des Mischvorgangs und wurde über eine Messdauer von 75 Stunden durchgeführt. Auch dieser Versuch fand in der Klimakammer des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der

Technischen Universität Kaiserslautern statt, in der die Raumtemperatur konstant auf 20 °C und die relative Luftfeuchte auf 65 % gehalten wurden.

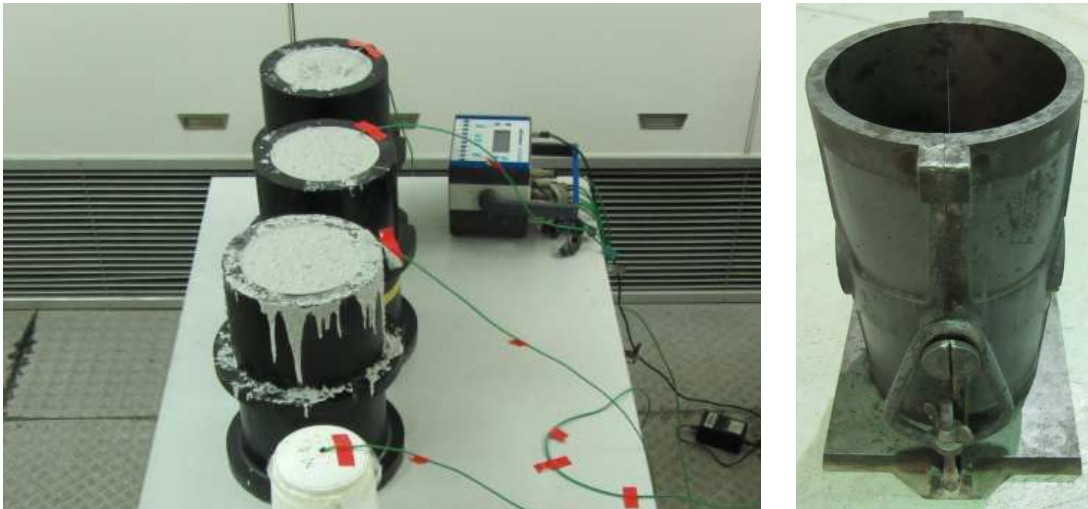


Abb. 8.7: links: Versuchsaufbau Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme in Abhängigkeit des verwendeten Schalungsmaterials (Versuchsreihe M1, Kunststoff), rechts: Zylinderschalung aus Stahl

Die folgende Abb. 8.8 zeigt die Mittelwerte der Temperaturverläufe der drei unterschiedlichen Mischungen M1, M2 und M3.

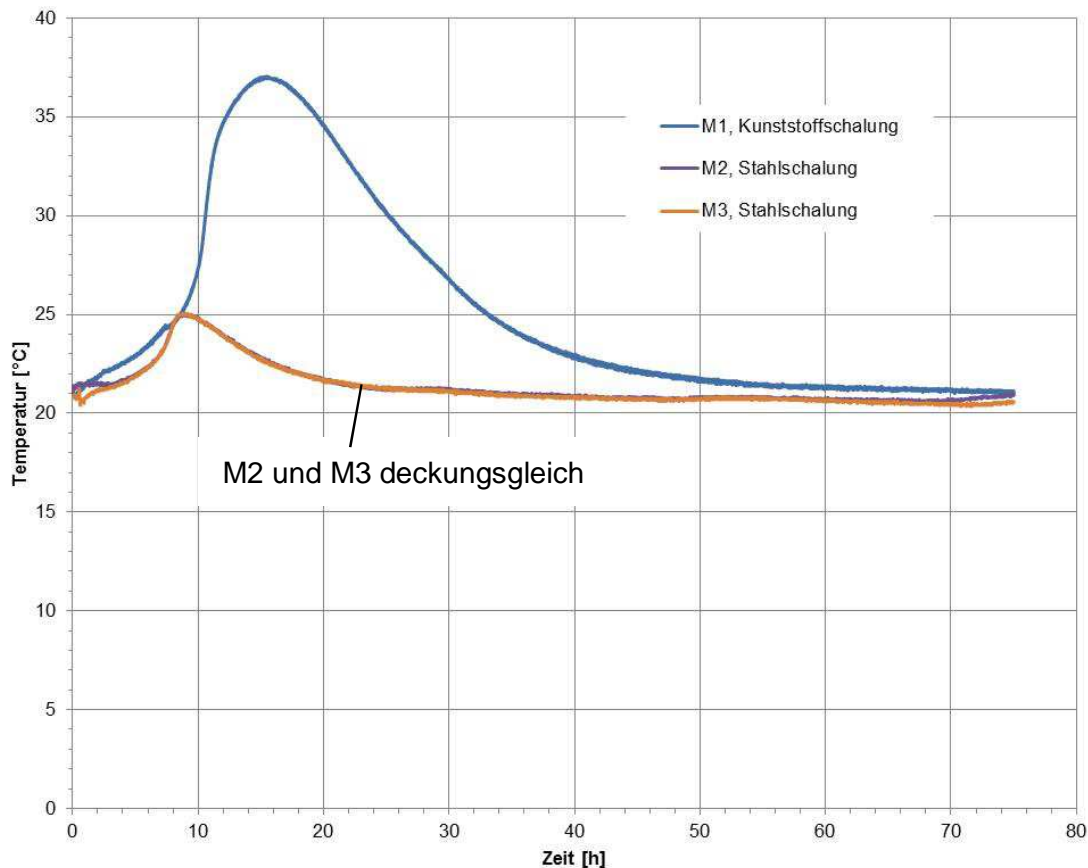


Abb. 8.8: Temperaturverläufe infolge Hydratationswärme von M1, M2 und M3 bei unterschiedlichen Schalungsmaterialien

Das Temperaturmaximum betrug 37,0 °C bei M1 (15,2 Stunden nach Mischende), 25,0 °C bei M2 (8,5 Stunden nach Mischende) und 25,1 °C bei M3 (8,7 Stunden nach Mischende).

Während Stahl Wärme ableitet, verfügt Kunststoff über wärmedämmende Eigenschaften, was sich an dieser Stelle deutlich zeigt. Die maximalen Temperaturen infolge Hydratationswärme von M2 und M3 unterschritten die von M1 zwar auch unter adiabatischen Lagerungsbedingungen (vergl. Abb. 4.9), jedoch bei weitem nicht so stark wie dies in Abb. 8.8 zu sehen ist.

Bei M1 wurde im Zeitraum zwischen dem Temperaturmaximum und einem Alter des Betons von 48 Stunden eine mittlere Abkühlgeschwindigkeit von 0,46 K/h gemessen, bei M2 betrug diese 0,11 K/h und bei M3 war diese 0,11 K/h, ebenfalls jeweils auf den Zeitraum zwischen Temperaturmaximum und einem Betonalter von 48 Stunden bezogen.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 4.5.3 dargestellten Abkühlgeschwindigkeiten unter adiabatischen Bedingungen liegen die hier gemessenen Abkühlgeschwindigkeiten unterhalb der in *DAfStb 2008* mittels Holz- und Stahlschalungen ermittelten und mit 0,5 bis 1,5 K/h angegebenen Abkühlgeschwindigkeiten.

Die in *DAfStb 2008* getroffene Aussage, dass bei der Erwärmung des Betons infolge seiner Hydratation der Einfluss der Schalungsbeschaffenheit dominiert, kann an dieser Stelle daher bestätigt werden.

Die maximale Temperatur infolge Hydratationswärme trat mit 37,0 °C bei Mischung M1 auf. Diese Mischung entwickelte auch unter adiabatischen Bedingungen bereits die höchste Temperatur infolge Hydratationswärme (vergl. Kapitel 4.5.3). Im Rahmen der hier beschriebenen Versuchsreihe wurde sie in der Kunststoffschalung gelagert, die im Vergleich zum Stahl die größere Wärmedämmwirkung vorweist. Die maximale Temperatur infolge Hydratationswärme blieb dennoch weit unter der nach *Norwegian Concrete 1999* nicht zu überschreitenden kritischen Temperatur von 65 °C. Es ist dadurch sichergestellt, dass der Beton auch beim Herstellen von Prüfkörpern unter der Verwendung einer Kunststoffschalung nicht geschädigt wird.

Die endgültige Schalung für die Serienproduktion von Parabolrinnen aus Beton ist noch zu entwickeln. Ausreichende Steifheit zur Erzielung der Formstabilität und Maßgenauigkeit des Bauteils ist dabei von großer Relevanz. Als Material für die Schalung sind Stahl oder Kunststoff denkbar. Bei der zuvor beschriebenen Versuchsreihe handelt es sich um Tastversuche, um erste Erkenntnisse zum Einfluss des Schalungsmaterials auf die Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme zu gewinnen. Weiterführende Untersuchungen sind erforderlich.

8.2.2.3 Schalung und Betonage

Die Eignung von Polystyrol als Schalungsmaterial unter dem Gesichtspunkt der maximalen Temperatur infolge Hydratationswärme ist somit erwiesen.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde eine Parabolrinne mit der gleichen Geometrie wie der des Großdemonstrators, allerdings in einem kleineren Maßstab mit einer Breite der Parabolrinne von 85 cm und einer Länge von 99 cm, hergestellt. Hierbei sollte zuerst die generelle Machbarkeit mit geringerem Aufwand, als dieser mit der Herstellung der Schale für den Großdemonstrator verbunden gewesen wären, getestet werden.

Dazu wurde eine Polystyrolschalung mittels eines CAD-gesteuerten heißen Drahtes hergestellt, welche anschließend von Hand mit glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) beschichtet wurde, um die hohen Anforderungen an die Betonoberfläche der Schalunginnenseite erfüllen zu können. Die Oberflächenrauigkeit einer Polystyroloberfläche allein ist hierfür nicht ausreichend.

Die fertige Schalung ist in der folgenden Abb. 8.9 gezeigt. Die unterschiedliche Farbgebung von Schalungsunterseite und -deckel haben keine Bedeutung.

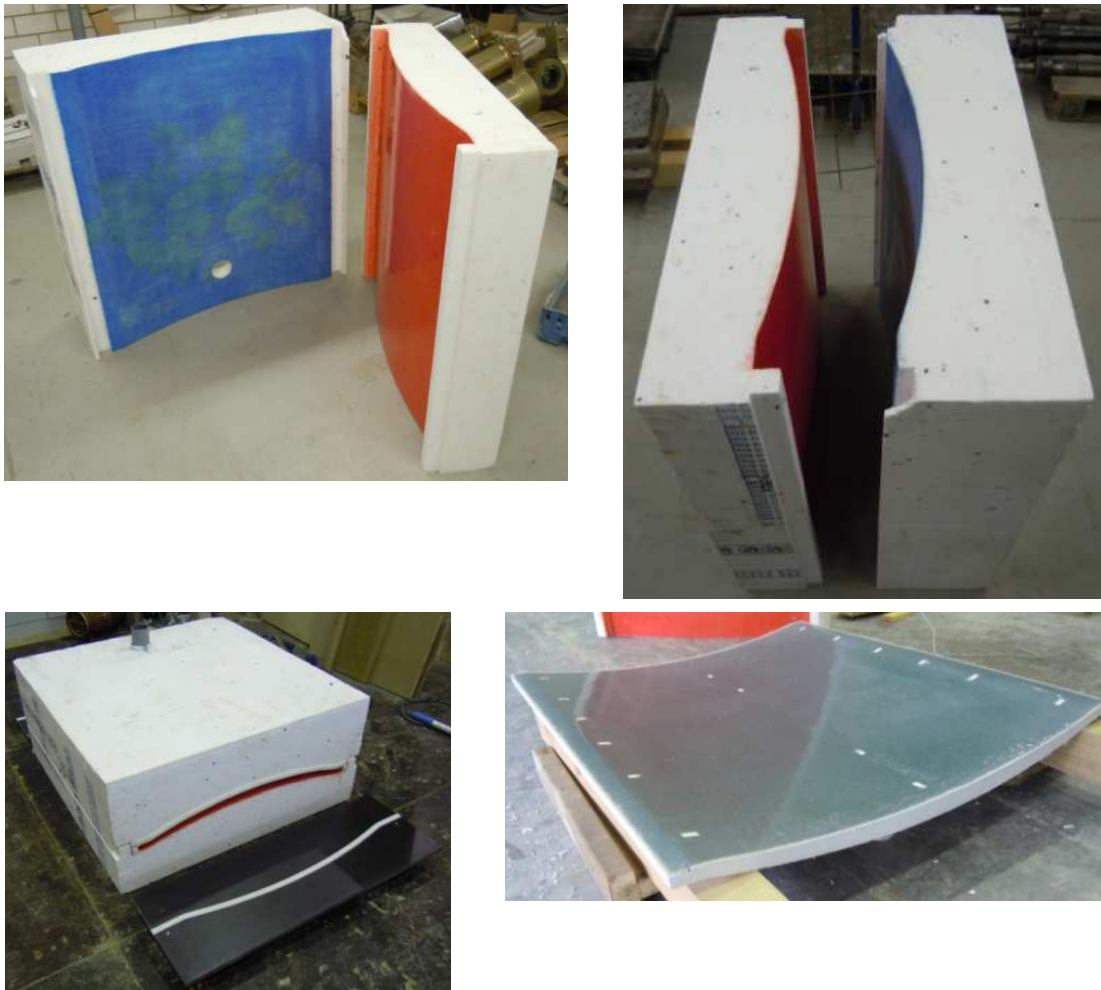


Abb. 8.9: Fertig gestellte Polystyrol-GFK-Schalung und ausgeschalter Probekörper (unbeschichtet)

Die durchgeführte Betonage lieferte zwei wesentliche Erkenntnisse: Zum einen übertraf die Qualität der Oberfläche alle Erwartungen (vergl. Abb. 8.9), zum anderen gestaltete sich das Ausschalen der Betonschale als äußerst schwierig, da das Betonbauteil und die Schalung kaum voneinander zu trennen waren. Die zwischen den beiden wirkende Adhäsion war so groß, dass die Eigenlast des Betons nicht ausreichte, die Rinne beim Anheben des Schalungsdeckels von diesem zu trennen.

Bezüglich der in Abb. 8.9 deutlich zu erkennenden Grünfärbung der Schaleninnenseite ist zu sagen, dass im verwendeten „Nanodur[®] Compound 5941 weiß“ Hochofenzement eingesetzt wird. Dieser enthält Sulfate, welche beim jungen Beton zu der beobachteten Grün- oder Blaufärbung führen. Wenn diese im Laufe der Zeit mit der Luft reagieren verschwindet die Verfärbung. Da die GFK-Beschichtung der verwendeten Schalung offensichtlich luftdicht war, weist die Schaleninnenseite eine starke Verfärbung auf, während die Seiten- und Stirnflächen gänzlich unverfärbt blieben.

Obwohl die verwendete Polystyrol-GFK-Schalung deutlich kostengünstiger als eine aus Stahl oder Holz gefräste Schalung war, waren ihre Herstellungskosten dennoch sehr hoch. Um den finanziellen Aufwand im Rahmen dieser Arbeit gering zu halten, wurde für die Herstellung der Parabolrinne im Maßstab 1:1 eine noch kostengünstigere Alternative gesucht. So wurde für diese eine von der Firma

Max Frank GmbH und Co. KG hergestellte Sonderschalung Fratec® eingesetzt. Diese besteht aus zwei Komponenten: Zum einen aus einem Polystyrolkern, der mittels eines CAD-gesteuerten heißen Drahtes zugeschnitten wurde, zum anderen aus einer Schalhaut aus selbstklebender Folie, welche heiß mit dem Polystyrol verklebt wurde.

An den freien Rändern der Randversteifungen der Parabolrinne wurden Holzquadratstäbe eingelegt. Diese dienten zum einen der Herstellung sauberer Kanten, zum anderen sollten sie das Ausschalen erleichtern.

Aufgrund der bei der oben beschriebenen Probebetonage einer kleinmaßstäblicheren Rinne gemachten Erfahrungen wurden stabile 13 mm breite Kunststoffballenpressbänder sowohl in das Unterteil der Schalung als auch in den Schalungsdeckel eingelegt und zur Lagesicherung mittels eines Sprühklebers mit der Schalhaut verklebt. Diese sollten verwendet werden, um Schalung und Betonteil bei eventuell auftretendem Ansaugdruck voneinander trennen zu können, ohne die Schalung zerstören zu müssen (vergl. Abb. 8.10, links).

Die beiden Stirnseiten der Schalung wurden mit durchsichtigen Plexiglasplatten abgestellt und mit 6 mm starken und 19 mm breiten Schaumstoffstreifen abgedichtet. Auf diese Weise konnte zumindest in den Endbereichen schon während des Betoniervorgangs kontrolliert werden, ob der Beton die Schalung planmäßig ausfüllt, oder ob sich Fehlstellen ausbilden.

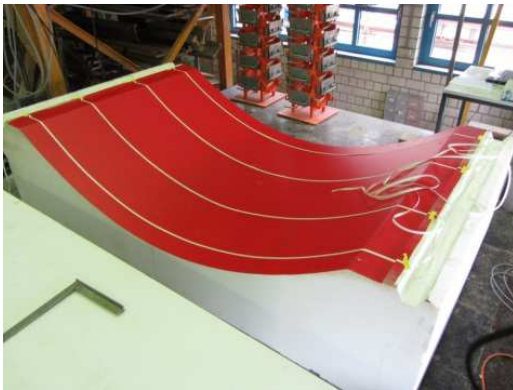


Abb. 8.10: Schalung der Parabolrinne des Großdemonstrators

Es wird darauf hingewiesen, dass die an dieser Stelle verwendete Schalung ausschließlich für die Herstellung eines einzelnen Demonstrators verwendet wurde. Für eine großmaßstäbliche Serienproduktion, die bei der Realisierung eines Parabolrinnenkraftwerks aus Betonkollektoren in der Praxis vorliegen würde, ist eine solche Schalung ungeeignet. Die dabei bestehenden Anforderungen würden eine steife, vielfach wiederverwendbare Stahlschalung unumgänglich machen. Die Praxis bietet hierfür jedoch Lösungen (Basso 2011). Aufgrund der sehr hohen zu produzierenden Stückzahl an Fertigteilen und dem für das Bauwesen enorm hohen Wiederholungsfaktor wären die mit einer solchen Schalung verbundenen Kosten aber durchaus wirtschaftlich tragbar.

Die Parabolschale wurde liegend betoniert, wobei das Einfüllen des Betons im Scheitel erfolgte. Dabei wies die später zu verspiegelnde Seite nach unten, wodurch eine lunkerfreie Herstellung der Schaleninnenseite realisiert werden konnte.

Das Einfüllen des Betons erfolgte über einen Kasten aus Siebdruckplatten mit vier gleichmäßig verteilten Kunststoffrohren mit einem Innendurchmesser von 75 mm, die als Einfüllstutzen fungierten. Auf diese Weise konnten die für die Parabolrinne erforderlichen 250 l Beton zügig eingebracht werden (vergl. Abb. 8.10, rechts).

8.2.2.4 Aufkleben der Auflagerrippen

Nach erfolgreicher Betonage und Ausschalen der Tonnenschale erfolgte im nächsten Arbeitsschritt das Ankleben der Auflagerrippen an diese (vergl. Abb. 8.11). Hierzu wurde der Schalungsdeckel abgehoben, die Rinne selbst wurde im Unterteil der Schalung belassen. Der Beton wurde an den Verklebungsstellen mit einer Schruppscheibe angeraut. Ausgeführt wurde die Verklebung mit dem Produkt „Sikafloor®-161“ der Firma Sika Deutschland GmbH (*Sika 2011 c*), welches mittels des Thixotropiermittels „Sika® Stellmittel T“ der Firma Sika Österreich GmbH (*Sika 2011 a*) auf die gewünschte Konsistenz eingestellt wurde.



Abb. 8.11: links: Aufrauen der Betonoberfläche, rechts: Verklebung der Auflagerrippen mit der Parabolrinne

8.2.3 Verspiegelung

Bei der Herstellung von Kollektorelementen solarthermischer Kraftwerke werden derzeit drei verschiedene Konzepte verfolgt, um deren Verspiegelung zu realisieren:

Reflektorfolie,

Glas-Silber-Spiegel,

PVD (Physical Vapour Deposition)-beschichtetes Aluminiumblech.

Nach *Geyer 2002* eignet sich eisenarmes Glas, welches einachsigt gekrümmt und rückseitig verspiegelt ist besonders gut für den Anwendungsfall Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Der Grund ist zum einen die dauerhaft gute Reflektivität für das solare Spektrum, zum anderen die hohe Kratzbeständigkeit.



Abb. 8.12: Vergleich zweier Verspiegelungskonzepte,
links: Aluminiumblech, rechts: selbstklebende Spiegelfolie

Bei der Verspiegelung des Großdemonstrators wurde jedoch aufgrund der einfachen Applikation ein PVD-beschichtetes Aluminiumblech mit einer Plattenstärke von 0,50 mm verwendet, auch wenn der Reflexionsgrad mit ca. 87 % im wesentlichen Lichtspektrum hinter denen von Spiegeln zurückbleibt (vergl. Abb. 8.12). So verfügen beispielsweise die für die Andasol-Kraftwerke 1 und 2 verwendeten Parabolspiegel nach *Solar Millennium 2011* über einen Reflexionsgrad von rund 93 %.

Das für den hier vorgestellten Großdemonstrator verwendete Reflektorblech Miro-Sun[®] wurde nach *Janotte 2009* auch bei dem PTC 1800-Kollektor eingesetzt, an den das Konzept des Demonstrators angelehnt ist. In Tab. 8.2 sind relevante technische Daten aufgelistet.

Tab. 8.2: Technische Daten Miro-Sun[®] weatherproof reflective 90 (Alanod 2010, Alanod 2012, Alanod 2013 a und Alanod 2013 b)

Miro-Sun [®] weatherproof reflective 90			
Eigenschaften	Parameter	Wert	Prüfnorm
Mechanisch	Zugfestigkeit [N/mm ²]	130 – 160	DIN EN 485-2
	Streckgrenze [N/mm ²]	125 – 155	DIN EN 485-2
	Dehnung (A50 %)	≥ 2	DIN EN 485-2
	Biegeradius	≥ 2-fache Materialdicke	
	Härte	Hart	DIN EN 485-2
	Werkstoff / Legierung	AL 99,85	DIN EN 573-3
Optisch	Solare Gesamtreflexion %	90	ASTM G 173
	Solare gewichtete gerichtete Reflexion (R^s_{solar}) %	≥ 84	ASTM G 173
	Solare gerichtete diffuse Reflexion %	≈ 5 – 6	ASTM G 173
	Licht – Gesamtreflexionsgrad %	≥ 92	DIN 5036-3
	Gerichtete Licht - Reflexion % längs	87	ISO 7668 60°
	Gerichtete Licht - Reflexion % quer	87	ISO 7668 60°
	Bearbeitung Vorderseite	PVD-veredelt und geschützt	
	PVD Beschichtung Vorderseite	PVD AL 99,99	
	Bearbeitung Rückseite	eloxiert	
Physikalisch	Spez. Dichte [g/cm ³]	2,7	
	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K ⁻¹]	23,5	
	Temperaturbeständigkeit (1000 h)	200 °C	
	Spez. Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	≥ 220	
Abmessungen	Dicke von bis [mm]	0,30 – 0,80	
	Breite bis max. [mm]	1250,00	

Das Material wurde in Form von Tafeln mit Abmessungen von 125 cm x 200 cm geliefert und für den Großdemonstrator zu vier Spiegeln mit den Abmessungen 116 cm x 159,5 cm zugeschnitten.

Für die Verklebung der Spiegel mit der Parabolrinne wurde gemeinsam mit den Firmen Lohmann GmbH & Co. KG und Sika AG ein Konzept erarbeitet. Dieses sah wie folgt aus: Unmittelbar vor der Applikation der Spiegel auf der Betonrinne wurden die Betonoberfläche mittels des Produkts „Sika[®] Primer-215“ (Sika 2013) der Firma Sika Deutschland GmbH vorbereitet und die Spiegelblechoberfläche mittels des Produkts „Sika[®] Aktivator-205“ (Sika 2011 b) der Firma Sika Schweiz AG gereinigt. Anschließend wurde das doppelseitige Haftklebeband „Duplocoll[®] 5122“ (Loh-

mann 2011 a und Lohmann 2011 b) der Firma Lohmann GmbH & Co. KG aufgebracht. Die Klebebandstreifen wurden im Abstand von circa 50 cm zueinander rechtwinklig zu den Schalenlängsrändern angeordnet (vergl. Abb. 8.14) und erfüllten zwei Funktionen: Zum einen die sofortige Fixierung der Spiegel bei der Montage an ihrer gewünschten Position, zum anderen die Einhaltung der zu erzielenden Klebschichtdicke von 1 mm. Zwischen den Klebebandstreifen wurde anschließend der einkomponentige Konstruktionsklebstoff „Sikaflex®-552“ (Sika 2012) der Firma Sika Deutschland GmbH mittels eines Zahnspachtels aufgetragen. Wichtige technische Eigenschaften können Tab. 8.3 entnommen werden. Die Spiegel wurden nun auf die Klebebandstreifen aufgelegt und durch einen Kunststoffandrückroller auf diesen fixiert. Der reaktive Konstruktionsklebstoff konnte durch diese Vorgehensweise, ohne die Eigenlast der Spiegel abtragen zu müssen, aushärten, da diese vom Klebeband gehalten wurden. Gemeinsam mit einer geeigneten Oberflächenvorbehandlung von Beton und Aluminium sowie der Verwendung eines reaktiven Konstruktionsklebstoffs wurde mittels dieses angewandten Konzepts die Dauerhaftigkeit der Verklebung sichergestellt.

Tab. 8.3: Technische Daten des verwendeten Konstruktionsklebstoffes

Technische Daten		Sikaflex®-552
Rohstoffbasis	-	Silanterminierte Polymere
Dichte vor Aushärtung	kg/dm ³	1,45
Verarbeitungstemperatur	°C	5 – 40
Zugfestigkeit nach ISO 527 / DIN 53504	N/mm ²	ca. 3
Temperaturbeständigkeit dauerhaft: Kurzfristig: 4 Stunden 1 Stunde		90 °C
		140 °C
		150 °C
Einsatztemperatur	°C	-40 bis +90

Um die Eignung dieser Vorgehensweise beim Anwendungsfall Großdemonstrator zu prüfen und um die Verbindung zwischen den zur Verspiegelung verwendeten PVD-beschichteten Aluminiumblechen und dem Nanodur®-Beton beurteilen zu können, wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern Haftzugversuche gemäß DAfStb 2001, Anhang C durchgeführt (vergl. Abb. 8.13). Der Grund für die Versuchsdurchführung nach dieser Richtlinie ist die hohe Elastizität des verwendeten einkomponentigen Konstruktionsklebstoffs „Sikaflex®-552“.

Es wurden vier quadratische Platten mit einer Seitenlänge von 350 mm und einer Plattendicke von 30 mm aus Nanodur®-Beton hergestellt. Dadurch war eine ausreichende Größe der Prüffläche gewährleistet und die Restdicke maß unter den Ausnahmen mindestens 20 mm, was über der geforderten Mindestrestdicke von 15 mm liegt. Auf jeder Platte wurden drei Spiegelblechproben auf ihren Haftverbund mit dem Beton getestet. Hierzu wurden in jede Platte drei Ringnuten mit einer diamantbesetzten Bohrkronen nass gebohrt. Die geforderte Ringnuttiefe von 5 mm bis 10 mm wurde eingehalten. Der Innendurchmesser der Ringnut sowie der Außendurchmesser des Prüfstempels betragen 50 mm. Es wurden Prüfstempel aus Stahl mit

kreisförmiger Klebefläche mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 30 mm verwendet. Die Prüfung erfolgte mit einer Zugvorrichtung nach *DIN EN ISO 7500-1* und *DIN EN ISO 9513*. Die Zugspannung wurde um 0,15 N/mm² pro Sekunde gesteigert, was einer Kraftsteigerung von rund 300 N/s entspricht.

Die Prüfstempel wurden mittels eines zweikomponentigen Reaktivklebstoffs auf Methylmethacrylatbasis auf das Aluminiumblech aufgeklebt.



Abb. 8.13: Abreißprüfung zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit zwischen Nanodur[®]-Beton und PVD-beschichtetem Aluminiumblech

Die Haftzugfestigkeit β_{HZ} kann mit folgender Formel bestimmt werden:

$$\beta_{\text{HZ}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_s^2}$$

mit: F = Im Versuch ermittelte Abreißkraft

d_s = Prüfstempeldurchmesser

Das Versuchsprogramm sowie dessen Ergebnisse sind in Tab. 8.4 dargestellt:

Tab. 8.4: Übersicht und Versuchsergebnisse Abreißprüfung

Versuch Nr.	Kleberalter [d]	Betonalter [d]	Versuchszahl	Abreißkraft [N]	Abreißfestigkeit Einzelwert [N/mm ²]	Abreißfestigkeit Mittelwert [N/mm ²]	Versagensart
1	1	28	3	840	0,42	0,41	B
2	1	28	3	670	0,34		B
3	1	28	3	920	0,47		B
4	2	28	3	280	0,14	0,18	Y/Z
5	2	28	3	270	0,14		B
6	2	28	3	510	0,26		B
7	3	28	3	1090	0,55	0,55	B
8	3	28	3	1210	0,61		B
9	3	28	3	980	0,50		B
10	6	28	3	1330	0,67	0,60	B
11	6	28	3	1290	0,66		Y/Z
12	6	28	3	930	0,47		B

Versagensart B = Kohäsionsversagen „Sikaflex[®]-552“

Versagensart Y/Z = Adhäsionsversagen zwischen Methylmethacrylatkleber und Prüfstempel

* Bei den Versuchen Nr. 4 und 11 kam es aufgrund der extrem glatten Spiegelblechoberfläche zum Adhäsionsversagen zwischen der Spiegelblechoberfläche und dem Prüfstempel (Versagensart Y/Z).

Es zeigte sich, dass die für den Demonstrator geplante Ausbildung der Klebeverbindung durchaus verwendet werden kann. Mit dieser wird auch bei Ansetzen des geringsten Mittelwerts von 0,18 N/mm² noch eine Abreißfestigkeit von 180 kN/m² erzielt, welche weit oberhalb einer auftretenden Beanspruchung beispielsweise infolge einer Windsglast liegt.

Außerdem ist erkennbar, dass der Kleber einige Tage benötigt, um seine maximale Festigkeit zu entwickeln. Seine Abreißfestigkeit ist aber schon nach einem Tag mehr als ausreichend für den Anwendungsfall Parabolrinne im solarthermischen Kraftwerk.

Es musste festgestellt werden, dass es nicht bei allen Proben gelang, das „Sikaflex[®]-552“ auf der kleinen Prüffläche flächendeckend aufzutragen. Dies lag an der steifen Kleberkonsistenz. Die Versuchsergebnisse lägen in der Realität daher noch höher, da der Kleber hier gemäß *Sika 2012* mittels Zahnspachtel auf der deutlich größeren Betonoberfläche des Demonstrators aufgebracht wird (vergl. Abb. 8.14). Dies war aufgrund der kleinen Versuchskörperabmessungen nicht möglich. In der Konsequenz blieben die erzielten Zugfestigkeiten weit unter denen nach Tab. 8.3.

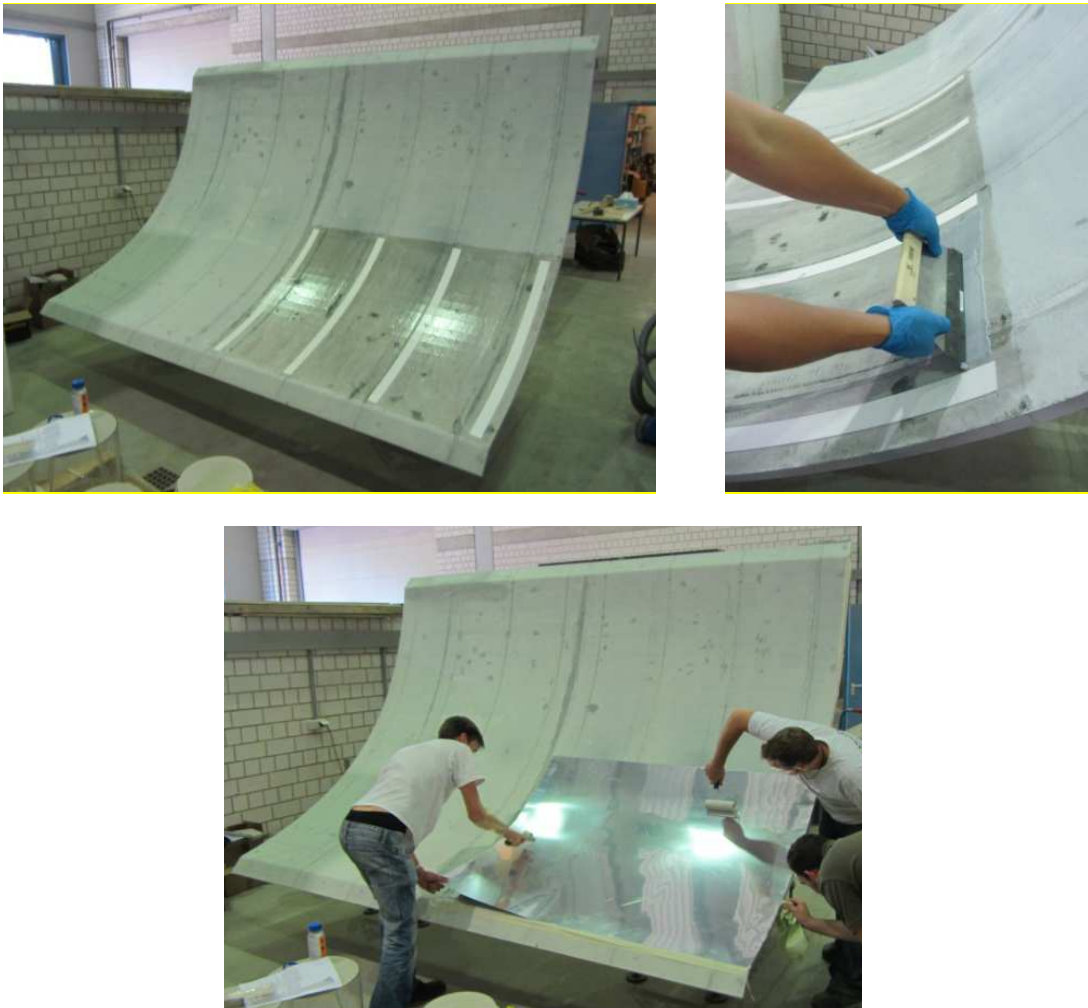


Abb. 8.14: oben links: Vorbereiteter Klebeuntergrund und doppelseitiges Haftklebeband, oben rechts: Aufspachteln des Reaktivklebstoffs, unten: Applikation eines Spiegelblechs

Auch nach über 30 Monaten Standzeit des Großdemonstrators bei freier Bewitterung waren keinerlei Ablösungserscheinungen zu erkennen. Die Verklebung zwischen den Spiegelblechen und der Betonschale war noch völlig intakt.

Wie zuvor bereits bei der Schalung wird an dieser Stelle auch beim Konzept der Verklebung darauf hingewiesen, dass es sich dabei um ein zur einmaligen Herstellung eines einzelnen Demonstrators geeignetes Konzept handelt, das für eine Serienproduktion in der Praxis umgearbeitet werden müsste.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das hier angewendete Verfahren durch die Verwendung eines Haftklebebands und eines leistungsstarken Reaktivklebstoffs redundant ausgelegt wurde. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit besteht deshalb noch Optimierungspotential. Für die Praxis taugliche Lösungen liegen vor.

8.2.4 Receiver

Als Receiver für den hier beschriebenen Demonstrator wurde ein Produkt der vierten Generation (*Gnädig 2013*) der Schott AG verwendet, die seit 2006 eine hochautomatisierte Serienfertigung in Bayern und seit 2008 eine weitere Fertigungsstätte in Spanien betreibt. Der Receiver besteht aus einem 3,40 m langen Stahlrohr, welches mit

einer strahlungsselektiven Absorberbeschichtung versehen ist, und einem 3,08 m langen Vakuumglasrohr. Dieses wird von einer evakuierten Hülle aus Glas mit einer Antireflexbeschichtung umgeben. Durch metallische Faltenbälge an den Enden kann die unterschiedliche Wärmedehnung von Absorber und Hülle kompensiert werden. Die vakuumdichte Verbindung zwischen Metall und Glashülle wird durch einen Glas-Metall-Einschmelzverbund realisiert. Mit einem maximalen Wirkungsgrad von etwa 70 % wird die konzentrierte Solarstrahlung durch den Receiver in Wärme konvertiert. Dies wird durch eine optimierte Strahlungsabsorption bei minimierten Wärmeverlusten erzielt (Benz 2007). Das Receiverprinzip ist in Abb. 8.15 dargestellt.

**AR-beschichtetes Hüllrohr
mit hoher Transmission**
Transmissionsgrad > 96 %
hohe Abriebfestigkeit

bruchsichere Glas-Metall-Verbindung
neue Werkstoffkombination mit
angepassten Ausdehnungskoeffizienten

**Stahlrohr mit hochselektiver
Beschichtung**
Solarer Absorptionsgrad > 95 %
Emissionsgrad < 14 % bei 400°C
hohe Lebensdauer



**Design mit kompaktem
Endbauteil**
Apertur > 96 %

Vakuumisolierung
Druck < 10^{-3} mbar, unterstützt
durch Gettertechnik

Abb. 8.15: Verwendetes Receiverrohr der Schott AG mit technischen Angaben
(Quelle: Benz 2007)

8.2.5 Fertigstellung des Großdemonstrators

Nach erfolgreicher Applikation der Spiegel konnten die Receiverhalterungen montiert werden. Diese wurden an den Randversteifungen der Parabolrinne angeschraubt. Nach Montage des Absorber- sowie des Glashüllrohres war der Demonstrator fertiggestellt und konnte mittels eines Autokrans an seinem endgültigen Standort auf dem Campus der TU Kaiserslautern aufgestellt werden.



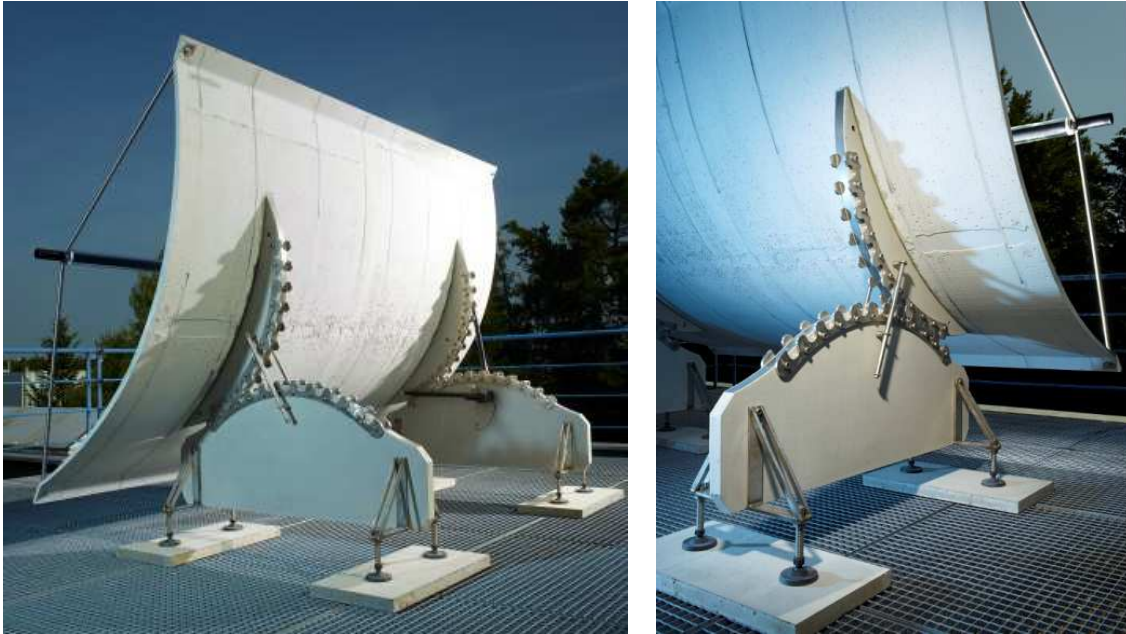


Abb. 8.16: Fertig gestellter Großdemonstrator an der TU Kaiserslautern
(Fotos: Thomas Brenner)

Der Großdemonstrator ist drehbar, und ist von der Morgen- bis zur Abendstellung verfahrbar. Durch seinen automatischen Antrieb und das Absorberrohr mit Glashüllrohr wurde er mit allen Komponenten ausgestattet, die erforderlich sind, um Energie aus Sonnenstrahlen zu gewinnen. In dieser Form könnte er ohne weiteres in ein Kollektorfeld integriert werden und ein das Absorberrohr durchströmendes Wärmeträgermedium erhitzen.

Ein geeigneter Standort wäre das Testgelände Plataforma Solar de Almería des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Südostspanien (vergl. Abb. 7.9) oder der DLR-Prüfstand Sopran in Köln-Porz (vergl. Abb. 3.2).

Es wurde bereits in zahlreichen Veröffentlichungen über den erfolgreich hergestellten Großdemonstrator berichtet: *Forman 2012*, *Forman 2013*, *Forman 2014*, *Forman 2015*, *Müller 2013 b*, *Müller 2014 a*, *Müller 2014 b*, *Müller 2014 c*, *Müller 2014 d*, *Pagels 2014* und *Schnell 2014*.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „*Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrippen solarthermischer Kraftwerke*“. Dieses ist ein Teilprojekt des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms „*Leicht Bauen mit Beton*“ SPP 1542 unter Koordination des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Dresden.

Zunächst wurde der Stand der Technik herkömmlicher Parabolrippensysteme beschrieben. Anschließend wurde ein eigenes Konzept für eine wirtschaftliche Konstruktionsvariante unter Verwendung des Werkstoffs Beton entwickelt.

Hinsichtlich der eingangs genannten Zielsetzungen bezüglich der Betoneigenschaften können die folgenden Ergebnisse formuliert werden. Es wurden wesentliche Kriterien für eine für die Serienfertigung von Betonkollektorelementen geeignete Betonrezeptur aufgestellt und umfassend untersucht. Diese werden im Folgenden nochmals aufgelistet und hinsichtlich ihrer Bearbeitung in dieser Arbeit bewertet:

1. Kriterium

Verformungsarmut und Formbeständigkeit zur Erzielung eines hohen Systemwirkungsgrads

Bewertung

Der rechnerisch ermittelte Interceptfaktor des Großdemonstrators betrug etwa 99 % und ist damit konkurrenzfähig im Vergleich zu derzeit bestehenden Systemen (vergl. Kapitel 7).

2. Kriterium

Hohe Biegezugfestigkeit bei Berücksichtigung von Ermüdung und Eigenspannungen sowie Rissefreiheit im Gebrauchszustand, um eine steife, verformungsarme Tragstruktur zu erzielen

Bewertung

Die erzielten Biegezugfestigkeiten des verwendeten Betons lagen weit oberhalb auftretender Biegezugspannungen (vergl. Kapitel 4 und 7). Risse sind optisch beim Großdemonstrator auch nach einer Standzeit bei freier Bewitterung von über 30 Monaten optisch nicht feststellbar.

3. Kriterium

Passende rheologische Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitbarkeit

Bewertung

Es wurden zahlreiche filigrane Bauteile mit Schalendicken bis zu 10 mm sowie der Großdemonstrator (vergl. Kapitel 5 und 8) erfolgreich hergestellt.

4. Kriterium

Eine geringe Erhärtungszeit zur Reduzierung der Schalfristen

Bewertung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte bereits eine Schalungsbelegzeit von nur zwei bis drei Stunden erzielt werden (vergl. Kapitel 5). Diese kann

durch weiterführende Untersuchungen möglicherweise noch weiter reduziert werden. Weitergehende Forschung diesbezüglich wird empfohlen.

5. Kriterium

Schwindarmes Verhalten, um ein Aufschüsseln der Parabolrinne zu vermeiden sowie die resultierenden Zwängungen gering zu halten

Bewertung

Um die Kosten im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens gering zu halten wurde eine kostengünstige Polystyrolschalung verwendet. Wie zu erwarten konnte mit dieser und dem verwendeten Beton nur eine bedingt maßgenaue Parabolrinne hergestellt werden (vergl. Kapitel 5). Es besteht daher noch weiterer Entwicklungsbedarf bezüglich einer noch besser geeigneten Schalung mit ausreichender Steifigkeit.

6. Kriterium

Kostengünstige Herstellung

Bewertung

Detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen waren nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

7. Kriterium

Hohe Wertschöpfung vor Ort

Bewertung

Es wurden keine Standortbetrachtungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Rohstoffen, welche für die Produktion von Parabolrinnen aus Beton erforderlich werden, angestellt.

Nachdem eine geeignete Betonrezeptur entwickelt worden war, galt es, die Realisierbarkeit eines Betonkollektors zu untersuchen. Dazu wurde im vorliegenden Forschungsprojekt ein Großdemonstrator konzeptionell und anschließend baulich umgesetzt. Hiermit wurde die Machbarkeit eines Kollektorelements aus Beton nachgewiesen. Des Weiteren führten die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung des für eine spätere Serienfertigung in Kapitel 7 vorgeschlagenen, möglichen Fertigungsverfahrens.

Der Großdemonstrator wurde darüber hinaus einer messtechnischen Genauigkeitsanalyse unterzogen, wodurch Verbesserungspotential benannt werden konnte. Dabei stellte sich heraus, dass die Steifigkeit der für die Herstellung der Parabolrinne verwendeten Schalung von immenser Wichtigkeit ist.

Außerdem wurde der Demonstrator numerisch berechnet und konnte dadurch hinsichtlich seiner Wirksamkeit unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen an einem geeigneten Standort mit bestehenden Systemen simulationsbasiert verglichen und beurteilt werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass aus hochfestem Beton hergestellte Parabolrinnen grundsätzlich eine Alternative zu solchen aus filigranen Stahlfachwerken mit punktförmig gestützten Spiegeln sind und standortbezogen eine attraktive Option darstellen. Dies gilt besonders dann, wenn aufgrund von Einsatzorten wie Nordafrika erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit wegen des salzhaltigen Wüstenklimas

bestehen und wenn eine möglichst hohe Wertschöpfung vor Ort von Interesse ist. Obwohl – wie beim Großdemonstrator realisiert – die Schalendicke nur wenige Zentimeter aufweist, sind die infolge direkter und indirekter Einwirkungen resultierenden Verformungen der Parabolrinne durch ihre hohe Steifigkeit gering. Dies führt zu einer zielgenauen Konzentration der von der verspiegelten Parabolrinnenoberfläche reflektierten Solarstrahlung. Der Interceptfaktor, der eben diese Zielgenauigkeit der Parabolrinne quantifiziert, ist dadurch sehr hoch, was positiv zum Gesamtwirkungsgrad des Systems beiträgt. Bei der Betonlösung wird eine Eigensteifigkeit der Spiegel gänzlich entbehrlich. Daher könnten nun grundsätzlich Spiegelfolien, sehr dünne Bleche oder sogar reflektierende Oberflächenbeschichtungen verwendet werden.

Bevor eine mit bestehenden Verfahren konkurrenzfähige, wirtschaftliche Serienproduktion von Parabolrinnen aus Beton möglich wird, besteht noch Optimierungspotential. So wären die Entwicklung eines innovativen Bewehrungskonzepts und ebenso die Optimierung der Geometrie der Schalenrückseite erforderlich, um dadurch die Verformungen noch weiter zu reduzieren und somit einen optimalen Systemwirkungsgrad zu erzielen. Außerdem wären die Verspiegelungstechnik und das Herstellungsverfahren zu automatisieren.

Diese noch zu meisternden Herausforderungen sind technisch jedoch lösbar. Wird zudem ein effizienter Fertigungsprozess in einer modernen Feldfabrik mit optimierten, industrialisierten und dem jeweiligen Standort angepassten Transport- und Montageprozessen zusammengeführt, erscheinen technisch und wirtschaftlich attraktive Lösungen einer Ausführung von Parabolrinnenkollektorfeldern in Betonbauweise möglich. Ein erster Ansatz für ein mögliches, Erfolg versprechendes Fertigungsverfahren zur Serienproduktion von Parabolrinnen aus Nanodur[®]-Beton konnte als ein Resultat der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen und Überlegungen vorgeschlagen werden (vergl. Kapitel 7).

Des Weiteren könnte der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Berechnungsalgorithmus weiter automatisiert werden, um auf diese Weise Parameterstudien mit beliebigen Kollektorgeometrien an unterschiedlichen Standorten unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen durchführen zu können. Außerdem wäre es zielführend, den hergestellten Großdemonstrator auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) aufzubauen und dort messtechnisch den Interceptfaktor zu ermitteln, wie dies bereits an seinem derzeitigen Standort in Kaiserslautern erfolgte. Auf diese Weise könnten die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Berechnungen verifiziert werden und eine Aussage darüber getroffen werden, wie gut die Simulation mit der Realität übereinstimmt.

Die Kapazität der Absorberrohre ist derzeit noch nicht ausgeschöpft. Sie sind darauf ausgelegt, die solare Strahlung einer größeren Reflektorfläche aufzunehmen, als dies mit derzeit in der Praxis erhältlichen Kollektortypen möglich ist. Aus diesem Grund steigt die Nachfrage nach Parabolrinnen mit einer größeren Aperturfläche.

Die Forderung der Betreiber von solarthermischen Kraftwerken nach zunehmend größeren Kollektorelementen ist auch in Betonbauweise, zum Beispiel durch die Anordnung von Versteifungen oder die Ausführung in Sandwichbauweise, möglich. Hierzu besteht umfassender Forschungsbedarf.

Dazu wurde an der TU Kaiserslautern bereits eine erste Machbarkeitsstudie begonnen, welche fortzuführen ist. Diese hat ein Parabolrinnenkonzept mit einer Aperturweite von 10 m aus hochfestem Beton mit Hohlkörpern zum Gegenstand, um die Forderung nach größeren Aperturweiten zu erfüllen (vergl. Abb. 9.1).



Abb. 9.1: Machbarkeitsstudie neue Parabolrinnengeneration aus hochfestem Beton
(Animation: Firma solarsolid)

Betrachtungen hinsichtlich der Torsionssteifigkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht angestellt. Ziel in der Praxis ist es zum einen, die Aperturweiten der Parabolrinnen weiter zu vergrößern. Zum anderen soll aus Wirtschaftlichkeitsgründen jedoch zusätzlich auch die Kollektorstranglänge erhöht werden, um die Anzahl der zur Rotation der Rinnen benötigten Antriebseinheiten zu reduzieren. Verdrillungseffekte gewinnen dabei an Bedeutung, sodass die Durchführung von Untersuchungen hierzu erforderlich wird. Falls der vorhandene Torsionswiderstand der Parabolrinnen sich als kritisch erweisen sollte, besteht die Möglichkeit, diesen durch die Anordnung von Rippen auf der Schalenrückseite zu erhöhen.

Die Auswirkungen von Kriech- und Dauerstandeffekten auf den Interceptfaktor wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher gehend untersucht (vergl. Kapitel 5). Auch hier wird weitere Forschungstätigkeit empfohlen.

Regelwerke und Normen

- ASTM G 173** ASTM G 173: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2003.
- BAW 2012** Bundesanstalt für Wasserbau: BAW Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, November 2012.
- DAfStb 2001** DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie) – Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, Oktober 2001.
- DAfStb 2012** DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, September 2012.
- DIN EN 196-1** DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Beuth Verlag, Berlin, Mai 2005.
- DIN EN 196-3** DIN EN 196-3: Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Beuth Verlag, Berlin, Februar 2009.
- DIN EN 206** DIN EN 206: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2014.
- DIN EN 206-9** DIN EN 206-9: Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB). Beuth Verlag, Berlin, September 2010.
- DIN EN 480-2** DIN EN 480-2: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit. Beuth Verlag, Berlin, November 2006.
- DIN EN 485-2** DIN EN 485-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten – Teil 2: Mechanische Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2013.
- DIN 488-1** DIN 488-1: Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung. Beuth Verlag, Berlin, August 2009.
- DIN 488-2** DIN 488-2: Betonstahl – Betonstabstahl. Beuth Verlag, Berlin, August 2009.
- DIN EN 573-3** DIN EN 573-3: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2013.
- DIN EN 933-1** DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren. Beuth Verlag, Berlin, März 2012.

- DIN 1048-5** DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Beuth Verlag, Berlin, Juni 1991.
- DIN EN 1097-6** DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Beuth Verlag, Berlin, September 2013.
- DIN EN 1097-7** DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren. Beuth Verlag, Berlin, Juni 2008.
- DIN 5036-3** DIN 5036-3: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Messverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen. Beuth Verlag, Berlin, November 1979.
- DIN EN ISO 7500-1** DIN EN ISO 7500-1: Metallische Werkstoffe – Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung, Beuth Verlag, Berlin, November 2004.
- DIN EN ISO 9513** DIN EN ISO 9513, Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2013.
- DIN EN 12350-2** DIN EN 12350-2: Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß. Beuth Verlag, Berlin, August 2009.
- DIN EN 12350-5** DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. Beuth Verlag, Berlin, August 2009.
- DIN EN 12350-6** DIN EN 12350-6: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte. Beuth Verlag, Berlin, März 2011.
- DIN EN 12350-7** DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren. Beuth Verlag, Berlin, August 2009.
- DIN EN 12350-8** DIN EN 12350-8: Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- DIN EN 12350-9** DIN EN 12350-9: Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- DIN EN 12350-10** DIN EN 12350-10: Prüfung von Frischbeton – Teil 10: Selbstverdichtender Beton – L-Kasten-Versuch. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- DIN EN 12350-12** DIN EN 12350-12: Prüfung von Frischbeton – Teil 12: Selbstverdichtender Beton – Blockiering-Versuch. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- DIN EN 12390-1** DIN EN 12390-1: Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2012.

<i>DIN EN 12390-3</i>	DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2009.
<i>DIN EN 12390-5</i>	DIN EN 12390-5: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2009.
<i>DIN EN 12390-7</i>	DIN EN 12390-7: Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2009.
<i>DIN CEN/TS 12390-10</i>	DIN CEN/TS 12390-10: Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes von Beton. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2007.
<i>DIN EN 12390-13</i>	DIN EN 12390-13: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Beuth Verlag, Berlin, April 2012.
<i>DIN EN 12620</i>	DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2013.
<i>DIN EN 1992-1-1</i>	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 mit DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 Nationaler Anhang, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2011.
<i>DIN EN 53504</i>	DIN EN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2009.
<i>ISO 7668</i>	ISO 7668: Anodisieren von Aluminium und Aluminiumlegierungen – Messung des gerichteten Reflexionsgrades und des Spiegelglanzes von anodisch erzeugten Oxidschichten bei Winkeln von 20°, 45°, 60° oder 85°. Beuth Verlag, Berlin, März 2011.
<i>ZTV-W 2012</i>	Bundesanstalt für Wasserbau: ZTV-W Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken, LB 219. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Gelbdruck, Juli 2012.

Literaturverzeichnis

- Ahrens 2011** Ahrens, M. A.; Mark, P.: Lebensdauersimulation von Betontragwerken. In: Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 4, 2011, S. 220-230.
- Aitcin 1997** Aitcin, P.; Neville, A.; Acker, P.: Integrated point of view of shrinkage deformation. In: Concrete International, 1997, S. 35-41.
- Alanod 2010** Produktbeschreibung „MIRO-SUN®“. Alanod GmbH & Co. KG, Ennepetal, Stand 11/2010.
- Alanod 2012** Reinigungsempfehlung für Eloxal-, MIRO®- und MIRO-SILVER®-Oberflächen“. Alanod GmbH & Co. KG, Ennepetal, Stand 03/2012.
- Alanod 2013 a** Imagebroschüre Alanod Solar. Alanod GmbH & Co. KG, Ennepetal, Stand 04/2013.
- Alanod 2013 b** Produktdatenblatt „MIRO-SUN® weatherproof reflective 90“. Alanod GmbH & Co. KG, Ennepetal, Stand 06/2013.
- Alonso 2002 a** Alonso, M. T.: Hochfester Beton (Teil 1). In: beton, Heft 11, 2002, S. 563-567.
- Alonso 2002 b** Alonso, M. T.: Hochfester Beton (Teil 2). In: beton, Heft 12, 2002, S. 621-625.
- Arqueros 2003** Arqueros, F.; Jiménez, A.; Valverde, A.: A Novel Procedure for the Optical Characterization of Solar Concentrators. In: Solar Energy 75, S. 135-142.
- Bader 2009** Bader, R.; Haueter, P.; Pedretti, A.; Steinfeld, A.: Optical Design of a Novel Two-Stage Solar Trough Concentrator Based on Pneumatic Polymeric Structures. In: Journal of Solar Energy Engineering 131, 2009.
- Bader 2011** Bader, R.; Pedretti, A.; Steinfeld, A.: A 9-m-Aperture Solar Parabolic Trough Concentrator Based on a Multilayer Polymer Mirror Membrane Mounted on a Concrete Structure. In: Journal of Solar Energy Engineering 133, 2011.
- Barcelo 2001** Barcelo, L.; Boivin, S.; Acker, P.; Toupin, J.; Clavoud, B.: Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms. In: Concrete Science and Engineering, Heft 10, 2001, S. 85-91.
- Baroghel-Bouny 2000** Baroghel-Bouny, V.: Experimental Study on Drying Shrinkage of Ordinary and High-Performance Cementitious Materials. In: International RILEM Workshop on shrinkage of concrete, Shrinkage 2000, RILEM Publications, Paris, 2000, S. 215-232.

- Bartelmeß 2013** Bartelmeß, L.; Monte, C.; Adibekyan, A.; Sohr, O.; Ottermann, C.; Korb, T.; Hollandt, J.: Characterization of high temperature solar thermal selective absorber coatings at operation temperature. In: SolarPACES, Las Vegas, USA, 2013.
- BASF 2013 a** Produktdatenblatt „X-SEED® 100“. BASF Performance Products GmbH, Krieglach, Stand 06/2013.
- BASF 2013 b** Leistungserklärung „X-SEED® 100“. BASF Performance Products GmbH, Krieglach, Stand 07/2013.
- BASF 2013 c** Produktdatenblatt „Glenium® ACE 430 (FM)“. BASF Construction Polymers GmbH, Staßfurt, Stand 07/2013.
- Basso 2011** Basso, A.: Einzigartige Betonfertigteileprodukte aus Italien. In: BetonWerk International, Heft 1, 2011, S. 184-193.
- Benz 2007** Benz, N.; Kuckelkorn, T.; Neumayr, A.; Graf, W.; Lüpfert, E.: Herausforderungen in der Produktion von Receivern für Parabolrinnenkraftwerke. In: Produktionstechnologien für die Solarenergie. Jahrestagung des Forschungsverbunds Solarenergie in Kooperation mit dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Leibniz-Universität Hannover, 2007.
- Bergner 1997** Bergner, H.: Rissbreitenbeschränkung zwangbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton. In: DAFStb, Schriftenreihe 482, Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- BINE 2008** BINE Informationsdienst: Solarthermische Kraftwerke werden Praxis, Projektinfo 07/08, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, www.bine.info, 2008.
- BINE 2011** BINE Informationsdienst: Die Sonnenseiten des Sattdampfes. Projektinfo 11/2011, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, www.bine.info, 2011.
- Breuer 2014** Breuer, J. DESERTEC - Sauberer Strom aus Wüsten. https://www.google.de/?gws_rd=ssl#q=DESERTEC+-+Sauberer+Strom+aus+W%C3%BCsten+Ein+Konzept+f%C3%BCr+Energiesicherheit+und+Klimaschutz+f%C3%BCr+eine+Welt+mit+10+Milliarden+Menschen, zuletzt zugegriffen am 27.11.2014.
- Burgess 2009** Burgess, G.; Shortis, M.; Kearton, A.; Garzoli, J.: Photogrammetry for dish concentrator construction. In: Solar 09, the 47th ANZSES Annual Conference, Queensland, Australien, 2009.
- Butler 1977** Butler, B. L.; Pettit, R. B.: Optical Evaluation Techniques for Reflecting Solar Concentrators. In: SPIE Proceedings, Volume 114, 1977, S. 43-49.

- Curbach 2012** Curbach, M. (Hrsg.); Ortlepp, R. (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 528 – Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung – Abschlussbericht (gekürzte Fassung). Forschungsbericht, SFB 528, Dresden, 2012.
- DAfStb 1991** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. In: Schriftenreihe des DAfStb, Heft 422, Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- DAfStb 1994** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Hochfester Beton, Sachstandsbericht. In: Schriftenreihe des DAfStb, Heft 438, Beuth Verlag, Berlin, 1994.
- DAfStb 2008** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. In: Schriftenreihe des DAfStb, Heft 561, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- Deuse 2009** Deuse, T.; Hornung, D.; Möllmann, M.: Von der Mikro- zur Nanodur-Technologie. In: BFT International, Heft 5, 2009, S. 2-10.
- Dittmar 2013 a** Dittmar, S.; Hauck, H. G.: C-S-H: Modernes Konzept zur Erhärtungsbeschleunigung, Teil 1. In: BFT International, Heft 1, 2013, S. 44-50.
- Dittmar 2013 b** Dittmar, S.; Hauck, H. G.: C-S-H: Qualitäts- und Effizienzsteigerung mit Erhärtungsbeschleuniger. In: BFT International, Heft 3, 2013, S. 36-44.
- DLR 2011** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Solarthermische Kraftwerke sind zuverlässige Technologie für die Energiewende.
http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10202/334_read-1898/year-2011/#gallery/3751, zuletzt zugegriffen am 27.11.2014.
- DLR 2014** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Forschung unter praxisnahen Bedingungen im größten europäischen Testzentrum für Concentrated Solar Power (CSP).
http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-7176/11942_read-28189/, zuletzt zugegriffen am 12.09.2014.
- Ducon 2009** Patent WO 2009/049571 A1, Firma Ducon, Walldorf, 23. April 2009.
- Duffie 2006** Duffie, J. A.; Beckmann, W. A.: Solar engineering of thermal processes. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- durcrete 2011 a** durcrete GmbH: Maschinenbetten und Werkzeuggestelle aus Nanodur[®]-Beton, Limburg an der Lahn, 2011.
- durcrete 2011 b** durcrete GmbH, Dyckerhoff AG: Ultrahochfestes Maschinenbett. In: maschine + werkzeug, September 2011, S. 302.

- durcrete 2011 c** durcrete GmbH: pure concrete – pure nature, Limburg an der Lahn, 2011.
- durcrete 2014** durcrete GmbH: Materialkennwerte Nanodur[®]-Beton für den Maschinenbau, Limburg an der Lahn, 2014.
- Dyckerhoff 2011** Portrait durcrete. Dyckerhoff AG, Wiesbaden, Dezember 2011.
- Dyckerhoff 2012** Unveröffentlichter Prüfbericht „Betonuntersuchungen im Rahmen des OLAF-Projektes (OLAF II) FIB AN 317-11“. Dyckerhoff AG, Wiesbaden, Oktober 2012.
- Dyckerhoff 2013** Produktdatenblatt „Dyckerhoff Nanodur[®] Compound 5941“. Dyckerhoff AG, Produktmarketing, Wiesbaden, Stand 05/2013.
- ELBA 2011** ELBA-Werk Maschinen-Gesellschaft mbH: Technical Description ELBA Laboratory Mixer EMS 60 C. ELBA-Werk Maschinen-Gesellschaft mbH, Ettlingen, Stand 05/2011.
- ELBA 2014** ELBA-Werk Maschinen-Gesellschaft mbH: Maschinen für Beton, ELBA, so macht man Beton. ELBA-Werk Maschinen-Gesellschaft mbH, Ettlingen, Stand 04/2014.
- Faust 2003** Faust, T.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2003.
- Fehling 2005** Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Borne-
mann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und
Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungs-
bericht, Universität Kassel, 2005.
- Feuerverzinken 2006** Institut Feuerverzinken GmbH: Feuerverzinkte Parabolrin-
nenkollektoren. In: Bautechnik 83, Heft 6, 2006, S. 458.
- Forman 2012** Forman, P.; Müller, S.: Shape-optimised Parabolic Trough
Collectors made of micro reinforced Ultra High Performance
Concrete. In: Proceedings of the 9th fib international PhD
Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe, KIT Scientific
Publishing, 2012, S. 297-302.
- Forman 2013** Forman, P.; Müller, S.: Verformungsoptimierte Parabolrin-
nenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: Beiträge
zum 54. Forschungskolloquium des DAfStb, Ruhr-
Universität Bochum (Hrsg.), 2013, S. 15-22.
- Forman 2014** Forman, P.; Mark, P.; Müller, S.; Schnell, J.: Design, detail-
ing and future potential of high-strength concrete collector
modules for parabolic troughs. In: ALITinform 36, Nr. 4-5,
2014, S. 48–58.
- Forman 2015** 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, proto-
type and proof of accuracy. In: Solar Energy 111, 2015, S.
364-377.

- Germann Instruments 2010** Germann Instruments A/S; Germann Instruments, Inc.: Auto-Shrink. Germann Instruments A/S, Kopenhagen, Dänemark, Germann Instruments, Inc., Evanston, USA, 2010.
- Geyer 2002** Geyer, M.; Lerchenmüller, H.; Wittwer, V.; Häberle, A.; Lüpfer, E.; Hennecke, K.; Schiel, W.; Brakmann, G.: Parabolrinnensysteme. In: Solarthermische Kraftwerke – Technologie und Perspektiven, Jahrestagung des Forschungsverbands Sonnenenergie, Stuttgart, 2002.
- Glass 1991** Glass, G. K.; Page, C. L.; Short, N. R.: Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated concrete. In: Corrosion Science 32, 1991, S. 1283-1294.
- Goldbach 2008** Goldbach, U.; Stehling, S.: Precasting of UHPC Elements. In: Proceedings 2nd International Symposium on UHPC Kassel, 2008, S. 589-596.
- GOM 2014** GOM mbH: ATOS Benutzerinformation, ATOS III und ATOS III SO (ab Rev. 01) Hardware, Braunschweig, 2014.
- Gnädig 2013** Gnädig, T.; Reitz, J.; Haibach, P.; Kuckelkorn, T.: Schott's 4th Generation Receiver – Getting ready for higher operation temperatures. In: SolarPACES, Las Vegas, USA, 2013.
- Grace 2012** Produktdatenblatt „Eclipse[®] Floor“. Grace Bauprodukte GmbH, Lügde, Stand 01/2012.
- Grotepaß 2001** Grotepaß, J.; Stümke, A.; Winterberg, H.; Rose, T.: Optischer Nachweis der Oberflächenqualität von Karosseriebauteilen. Human Solutions GmbH, Kaiserslautern, Audi AG, Ingolstadt.
- Gühring 2002** Gühring, J.: 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 560, München 2002, ISBN 3 7696 9599 2.
- Hainer 2013** Hainer, S.; Proske, T.: Einfluss der Umgebungsbedingungen auf den Karbonatisierungswiderstand von Beton. In: Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures (28), Darmstadt, 2013.
- Hammer 1999** Hammer, T. A.: Test method for linear measurements of autogenous shrinkage before setting. In: Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the international workshop organized by Japan Concrete Institute, Hiroshima, E&FN Spon, London, 1999, S. 143-154.
- Hansche 1978** Hansche, B. D.: Laser Ray Trace Tester for Parabolic Trough Solar Collectors. In: ISA, NDT Technology Division 9352, Sandia Laboratories, New Mexico, USA, 1978, S. 485-490.
- Haque 2005** Haque, M. N.: Provisions in the African Concrete Code for Designing Durable Structures. In: African Concrete Code Symposium, Tripolis, Libyen, 2005.

- Haque 2006** Haque, M. N.; Al-Khaiat, H.; John, B.: Proposals for a Draft Code for Designing Durable Concrete Structures in the Arabian Gulf. In: The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 31, 2006.
- Haque 2008** Haque, M. N.; Al-Khaiat, H.; John, B.: Durability Design in the African Concrete Code. In: 33rd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapur, 2008.
- Harte 2012** Harte, R.; Höffer, R.; Krätzig, W. B.; Mark, P.; Niemann, H.-J.: Solare Aufwindkraftwerke: Ein Beitrag der Bautechnik zur nachhaltigen und wirtschaftlichen Energieerzeugung. In: Bautechnik 89, Heft 3, 2012, S. 173-181.
- Harte 2013** Harte, R.; Höffer, R.; Krätzig, W. B.; Mark, P.; Niemann, H.-J.: Solar updraft power plants: Engineering structures for sustainable energy generation. In: Engineering Structures 56, 2013, S. 1698-1706.
- Hauser 1999 a** Hauser, S.: Hochfester Fasermattenbeton SIMCON Neu, DUCON. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1999.
- Hauser 1999 b** Hauser, S.; Wörner, J. D.: DUCON, ein innovativer Hochleistungsbeton, Teil 1. In: Beton- und Stahlbetonbau 94, Heft 2, 1999, S. 66-75.
- Hauser 1999 c** Hauser, S.; Wörner, J. D.: DUCON, ein innovativer Hochleistungsbeton, Teil 2. In: Beton- und Stahlbetonbau 94, Heft 2, 1999, S. 141-145.
- Hegger 2012** Hegger, J.; Schmachtenberg, E. M.: Abschlussbericht des Sonderforschungsbereich SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Eigenverlag, 2012.
- Hoffschmidt 2009** Hoffschmidt, B.; Alexopoulos, S.: Überblick über solarthermische Kraftwerke. In: DPG Tagung, Fachsitzungen des Arbeitskreises Energie (AKE), Hamburg, 2009.
- Hoffstiepel 2011** Hoffstiepel, A.: 3D-Laserscanner. In: Bautechnik 88, Heft 11, 2011, S. A8-A9.
- Huber 1993** Huber, H.: Hochleistungsbeton – Internationaler Stand und Folgerungen. In: Zement und Beton, Heft 3, 1993, S. 2-4.
- Hug 2007** Hug, R.: Solarstrom aus der Wüste statt Wüste in Deutschland: Erneuerbare Energien im transeuropäischen Verbund. http://www.google.de/imgres?sa=X&biw=1280&bih=852&tbm=isch&tbnid=7AMzHpjjHoZYeM%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.solarserver.de%2Fsolarmagazin%2Fartikel-februar2007.html&docid=sd1uiJ9icE8xeM&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.solarserver.de%2Fuploads%2Fpics%2Fschottt_eignung.gif&w=362&h=259&ei=iy6UrbAF-GlyAOEkl-GoAQ&zoom=1&iact=rc&dur=395&page=1&start=0&ndsp=18&ved=0CFoQrQMwAQ
zuletzt zugegriffen am 11.02.2014.

- Hug 2013** Hug, A.: Solarspiegel aus Plastikfolien. <http://www.srf.ch/wissen/technik/solarspiegel-aus-plastikfolien>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014.
- Janotte 2009** Janotte, N.; Meiser, S.; Krüger, D.; Pitz-Paal, R.; Fischer, S.; Müller-Steinhagen, H.; Walder, M.: Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit des Parabolrinnenkollektors PTC 1800. In: 19. Symposium Thermischer Solarenergie, Bad Staffelstein, 6.–8. Mai 2009.
- Jensen 1995** Jensen, O. M.; Hansen, P. F.: A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste. In: Materials and Structures, Volume 28, 1995, S. 406-409.
- Jensen 2001** Jensen, O. M.; Hansen, P. F.: Autogenous deformation and RH-change in perspective. In: Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 12, 2001, S. 1859-1865.
- Jones 1997** Jones, A. J.; Gruetzner, J. K.; Houser, R. M.; Edgar, R. M., Wendelin, T. J.: VSHOT Measurement Uncertainty and Experimental Sensitivity Study. In: Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 27.07.-01.08.1997, Honolulu, Hawaii.
- Justnes 1996** Justnes, H.; van Gemert, D.; Verboven, F.; Sellevold, E. J.: Total and external chemical shrinkage of low w/c ratio cement pastes. In: Advances in Cement Research, Heft 31, 1996, S. 121-126.
- Kammel 2003** Kammel, S.: Deflektometrie zur Qualitätsprüfung spiegelnd reflektierender Oberflächen. In: Technisches Messen 70, Heft 4, 2003, S. 193-198.
- Kirchner 1979 a** Kirchner, G.: Energiesparender Wärmeschutz (2). In: Technische Nachrichten, Philipp Holzmann Aktiengesellschaft, 1979.
- Kirchner 1981 b** Kirchner, G.: Energiesparender Wärmeschutz (7). In: Technische Nachrichten, Philipp Holzmann Aktiengesellschaft, 1981.
- Köhne 1985 a** Köhne, R.; Rach, E.: Microprocessor-Controlled Optical Measurement System for Large Mirror Modules, DFVLR, Stuttgart.
- Köhne 1985 b** Köhne, R.; Rach, E.; Reich, F.: Prozessrechnergesteuerte Anlage zur optischen Vermessung großer Spiegeloberflächen. Forschungsbericht DFVLR-FB-85-58, 1985.
- König 2000** König, H.; Grimm, R.: Hochleistungsbeton. In: Betonkalender 2000, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2000, S. 327-439.
- Konz 2014** Konz, H.-J.: Perspektiven solarer Energieversorgung. Schott AG, Mainz, 2014.
- Krätzig 2010** Krätzig, W. B.; Bottenbruch, H.; Harte, R.; Höffer, R.; Mark, P.; Niemann, H.-J.: Aufwindkraftwerke – Solarstrom aus der Wüste. In: Bautechnik 87, Heft 2, 2010, S. 116-119.

- Krüger 2007** Krüger, D.; Pandian, Y.; Hennecke, K.: Solare Kühlung mit Parabolrinnenkollektoren im REACT Projekt. In: 10. Kölner Sonnenkolloquium, Köln, 2007.
- Krüger 2008** Krüger, D.; Pandian, Y.; Hennecke, K.; Schmitz, M.: Parabolic trough collector testing in the frame of the REACT project. In: Desalination 220, 2008, S. 612-618.
- Laing 2002** Laing, D.; Schiel, W.; Heller, P.: Dish-Stirling-Systeme – Eine Technologie zur dezentralen solaren Stromerzeugung. In: Solarthermische Kraftwerke – Technologie und Perspektiven, Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie, Stuttgart, 2002.
- Lerchenmüller 2004** Lerchenmüller, H.; Morin, G.; Quaschnig, V.: Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie im Vergleich. Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, 2004.
- Lohmann 2011 a** Vorläufiges Datenblatt „DuploCOLL[®] 5122 - Doppelseitiges Montageklebeband mit kältebeständigem Acrylathaftstoff und flexiblem Schaumstoffträger“. Lohmann GmbH & Co. KG, Neuwied, Stand 0/2011.
- Lohmann 2011 b** Verarbeitungsanleitung für doppelseitige Haftklebebänder. Lohmann GmbH & Co. KG, Neuwied, Stand 08/2011.
- Ludwig 2011** Ludwig, H.-M.; Dressel, D.: Synthetische Calcium-Silikat-Hydrate in Fertigteilbetonen. In: BetonWerk International, Heft 5, 2011, S. 46-50.
- Lüpfert 2003** Lüpfert, E.; Zara, E.; Geyer, M.; Nava, P.; Langenkamp, J.; Schiel, W.; Esteban, A.; Osuna, R.; Mandelberg, E.: Euro-Trough Collector Qualification Complete – Performance Test Results from PSA. In: ISES Solar World Congress, Göteborg, Schweden, 2003.
- Lüpfert 2004** Lüpfert, 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: EuroSun 2004, 14. Internationales Sonnenforum, Freiburg, 2004.
- Lüpfert 2007** Lüpfert, E.; Pottler, K.; Ulmer, S.; Schiel, W.; Heimsath, A.; Platzer, W.; Pitz-Paal, R.: Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung solarthermischer Kraftwerkskomponenten. In: Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie, Produktionstechnologien für die Solarenergie, Hannover, 2007.
- Lüpfert 2009** Lüpfert, E.; Ulmer, S.: Solar Trough Mirror Shape Specifications. In: SolarPACES, Berlin, 2009.
- Maekawa 2003** Maekawa, K.; Ishida, T.; Kishi, T.: Multi-scale modelling of concrete performance: integrated material and structural mechanics. In: Journal of Advanced Concrete Technology 1 (2), 2003, S. 91-126.
- Mohr 1999** Mohr, M.; Svoboda, P.; Unger, H.: Praxis solarthermischer Kraftwerke. Springer Verlag, Berlin, 1999.

- Müller 2002** Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriechen und Schwinden von Beton, Grundlagen der neuen DIN 1045 und Ansätze für die Praxis. In: Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 1, 2002, S. 8-19.
- Müller 2013 a** Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Collectors for solar parabolic trough power plants made of micro reinforced Ultra High Performance Concrete. In: Proceedings on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, Johannesburg, South Africa, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2013, S. 491-498.
- Müller 2013 b** Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. In: Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 11, 2013, S. 752-762.
- Müller 2014 a** 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: Justnes, H. (Ed.): Proceedings of the Concrete Innovation Conference 2014 – CIC 2014, 11.–13.06.2014, Oslo, Norway, S. 97 (abstract, full paper on CD).
- Müller 2014 b** Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Concrete collectors for parabolic trough solar power plants. In: Proceedings of the 10th fib international PhD Symposium in Civil Engineering, Quebec City, Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB), Université Laval, Québec, 2014, S. 309-314.
- Müller 2014 c** Müller, S.; Schnell, J.: Parabolrinnen für solarthermische Kraftwerke. In: Leicht Bauen mit Beton, Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 – Förderphase 1, Silke Scheerer, Manfred Curbach (Hrsg.), 2014, S. 94-101.
- Müller 2014 d** Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Kollektorelemente solarthermischer Kraftwerke aus innovativen hochfesten Betonfertigteilen. In: BetonWerk International, Heft 5, 2014, S. 182-188.
- Nava 2007 a** Nava, P.; Lüpfert, E.; Wohlfahrt, A.: Der Bau solarthermischer Kraftwerke – Produktion und Logistik der Montage. In: Produktionstechnologien für die Solarenergie. Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie in Kooperation mit dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Leibniz-Universität Hannover, 2007.
- Nava 2007 b** Nava, P.; Lüpfert, E.; Wohlfahrt, A.: Der Bau solarthermischer Kraftwerke – Produktion und Logistik der Montage (Vortragsfolien). In: Produktionstechnologien für die Solarenergie. Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie in Kooperation mit dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Leibniz-Universität Hannover, 2007.
- Norwegian Concrete 1999** Norwegian Concrete Association Publication No 22: Lightweight Aggregate Concrete – Specifications and Guidelines. 1999.

- Nürnberg 1995** Nürnberg, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1995.
- Opus C 2011** Guter Empfang – UHPC-Garderobenstelen im Bibelhaus Frankfurt. In: opus C, Heft 6, 2011, S. 76-77.
- Pagels 2014** Pagels, D.: Innovationen in Beton. In: TB-iNFO, 15. Jahrgang, Nr. 54, 2014, S. 12-15.
- Pedretti 2013** Andrea Pedretti:
<http://www.3sat.de/mediathek/index.php?display=1&mode=play&obj=36321>,
zuletzt abgerufen am 23.01.2014.
- Peitsmeier 2013** Peitsmeier, H.: Der Wüstenstrom kommt 2020 nach Europa. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 8. Juni 2013.
- Persson 1998** Persson, B. S. M.: Shrinkage of High-Performance concrete. In: Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the international workshop organized by Japan Concrete Institute, Hiroshima, E&FN Spon, London, 1999, S. 105-120.
- Persson 2000** Persson, B.: On the under-pressure in the pore water of sealed high performance concrete, HPC. In: Concrete Science and Engineering, Heft 8, 2000, S. 213-221.
- Peter 2008** Peter, M. A.; Muntean, A.; Meier, S. A.; Bohm, M.: Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study. In: Cement and Concrete Research 38, 2008, S. 1385-1393.
- Philip 2003** Philip, U.; Dehn, F.; Schreiter, P.: Temperatureinfluss auf die Phasen- und Gefügebildung von UHPC. In: Ultrahochfester Beton, Bauwerk Verlag, Berlin, 2003, S. 79-88.
- Pitz-Paal 2002** Pitz-Paal, R.; Buck, R.; Hoffschmidt, B.: Solarturmkraftwerkssysteme. In: Solarthermische Kraftwerke - Technologie und Perspektiven, Jahrestagung des Forschungsverbands Sonnenenergie, Stuttgart, 2002.
- Pitz-Paal 2004** Pitz-Paal, R.: Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt. In: Physik in unserer Zeit, Spezial: Solarenergie, 2004, S. 12-19.
- Pottler 2005** Pottler, K.; Lüpfer, E.; Johnston, G. H. G.; Shortis, M. R.: Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components. In: Journal of Solar Energy Engineering, Volume 127, 2005, S.94-101.
- Pottler 2007** Pottler, K.; Röger, M.; Lüpfer, E.: Parabolrinnen-Qualitätskontrolle in der Serienfertigung „Q-Foto“. In: 10. Kölner Sonnenkolloquium, Köln, 2007.
- Richard 1995** Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes. In: Cement and Concrete Research 25, Nr. 7, 1995, S. 1501-1511.
- Riffelmann 2004** Riffelmann, K.-J.; Neumann, A.; Wittkowski, M.: PARAS-CAN: A New parabolic Trough Flux Scanner. In: ISES Solar World Congress, Göteborg, Schweden, 2003.

- RILEM 1988** RILEM TC 56-MHM: CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. In: Materials and Structures, 1988, S. 453-455.
- Ruegamer 2013** Ruegamer, T.; Kamp, H.; Kuckelkorn, T.; Schiel, W.; Weinrebe, G.; Nava, P.; Riffelmann, K.-J.: Molten Salt for Parabolic trough Applications: System Simulation and Scale Effects. In: SolarPACES, Las Vegas, USA, 2013.
- Sagmeister 2012 a** Sagmeister, B.: Nanodur[®] – ein Hochleistungsbeton für Maschinenbetten. In: Vortragsband Wangener Maschinentage, 2012, S. 46-56.
- Sagmeister 2012 b** Sagmeister, B.; Deuse, T.: Anwendungen von UHPC auf Basis eines Spezialbindemittels in Bautechnik und Maschinenbau. In: BetonWerk International, Heft 1, 2012, S. 2-6.
- Sagmeister 2012 c** Sagmeister, B.: On the Way to Micrometer Scale: Applications of UHPC in Machinery Construction. In: Proceedings of Hipermat 2012, Universität Kassel (Hrsg.), 2012, S. 819-823.
- Schiel 2004** Schiel, W.; Bergemann, R.: 20 Jahre Entwicklung von solarthermischen Kraftwerken. In: Stahlbau 73, Heft 12, 2004, S. 959-972.
- Schiel 2007** Schiel, W.: World's biggest solar power plant under construction in Spain. In: Eigenverlag Schlaich Bergemann und Partner, Stuttgart, 2007.
- Schiel 2011** Schiel, W.: Mit dem DLR zum "Next Generation Parabolic Trough". In: Kölner Sonnenkolloquium, Jülich, 2011.
- Schiel 2012** Schiel, W.: Kollektorentwicklung für solare Parabolrinnenkraftwerke. In: Bautechnik 89, Heft 3, 2012, S. 182-191.
- Schlaich 1982** Schlaich, J.: Neue und erneuerbare Energiequellen. In: Beton- und Stahlbetonbau 77, Heft 4, 1982, S. 89-104.
- Schleibinger 2013** Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH: Der Schleibinger Schwindkegel: Ein Laserstrahl misst berührungslos und mikrometergenau das ganz frühe Schwinden und Dehnen von Baustoffen, 2013.
- Schmidt 2003** Schmidt, M.; Fehling, E.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.: Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik, Heft 3, 2003, S. 16-29.
- Schmidt 2007** Schmidt, M.: Einsatz von UHPC beim Bau der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. In: Beton 57, Heft 6, 2007, S. 252-255.
- Schmidt 2008** Schmidt, M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 561, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- Schnell 2014** Schnell, J.; Mark, P.: Parabolrinnen aus hochfestem Beton für Solarkraftwerke. In: BFT International (2), 2014, S. 84-85.

- Schott 2014** Schott PTR[®]70 Receiver, Schott Solar CSP GmbH, Mainz, 2014.
- Shortis 1996** Shortis, M. R.; Johnston, G. H. G.: Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part I: Measurements of Surfaces. In: ASME Journal of Solar Energy Engineering 118, 1996, S. 146-150.
- Shortis 1997** Shortis, M. R.; Johnston, G. H. G.: Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part II: Assessment of Surfaces. In: ASME Journal of Solar Energy Engineering 119, 1997, S. 286-291.
- Shortis 2008** Shortis, M. R.; Johnston, G. H. G.; Pottler, K.; Lüpfer, E.: Photogrammetric Analysis of Solar Collectors. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII, Part B5, Peking, 2008, S. 81-87.
- Sika 2011 a** Produktdatenblatt „Sika[®] Stellmittel T“. Sika Österreich GmbH, Bludenz-Bings, Stand 03/2011.
- Sika 2011 b** Produktdatenblatt „Sika[®] Aktivator-205“. Sika Schweiz AG, Zürich, Stand 03/2011.
- Sika 2011 c** Produktdatenblatt „Sikafloor[®]-161“. Sika Deutschland GmbH, Stuttgart, Stand 12/2011.
- Sika 2012** Produktdatenblatt „Sikaflex[®]-552“. Sika Deutschland GmbH, Bad Urach, Stand 06/2012.
- Sika 2013** Produktdatenblatt „Sika[®] Primer-215“. Sika Deutschland GmbH, Bad Urach, Stand 05/2013.
- Sohr 2013** Sohr, O.; Möllenhoff, M.; Kuckelkorn, T.: Laser induced release of encapsulated noble gas in Schott receiver. In: SolarPACES, Las Vegas, USA, 2013.
- Solar Millennium 2011** Die Parabolrinnen-Kraftwerke Andasol 1 bis 3. Die größten Solarkraftwerke der Welt; Premiere der Technologie in Europa. Solar Millennium AG, Erlangen, Stand 2011.
- Solar Millennium 2014** Solar Millennium AG: Funktionsweise eines Parabolrinnen-Kraftwerks mit thermischem Speicher. Solar Millennium AG, Erlangen, 2014.
- Sule 2001** Sule, M.; van Breugel, K.: Cracking behaviour of reinforced concrete subjected to early-age shrinkage. In: Materials and Structures 34, 2001, S. 284-292.
- Ulmer 2004** Ulmer, S.; Riffelmann, K.-J.; Lüpfer, E.; Neumann, A.: Comparative Flux Measurement and Raytracing for the Characterization of the Focal Region of Solar Parabolic Trough Collectors. In: ASME Congress Solar 2004, Portland, Oregon, USA, 2004.
- Ulmer 2007** Ulmer, S.; Pottler, K.; Lüpfer, E.; Röger, M.: Measurement Techniques for the Optical Quality Assessment of Parabolic Trough Collector Fields in Commercial Solar Power Plants. In: Energy Sustainability, Long Beach, USA, 2007.

- Ulmer 2009** Ulmer, S.; Heinz, B.; Pottler, K.; Lüpfer, E.: Slope Error Measurements of Parabolic Troughs Using the Reflected Image of the Absorber Tube. In: Journal of Solar Energy Engineering, Volume 131, 2009.
- Visser 2012** Visser, J. H. M.: Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cementing materials – Limitation of the acceleration due to drying. In: Heron, Volume 57, no. 3, 2012, S. 231-247.
- Watter 2009** Watter, H.: Nachhaltige Energiesysteme. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- Weicken 2013** Weicken, H.: Einfluss von Umgebungstemperaturen auf die autogenen Schwindverformungen von Vergussmörteln in Offshore Anwendungen. In: Beiträge zum 54. Forschungskolloquium des DAfStb, Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.), 2013, S. 159-164.
- Weiss 2003** Weiss, J.: Experimental determination of the „Time Zero“, t_0 („Maturity-Zero“, M_0). In: Early Age Cracking in Cementitious Systems, Report of RILEM Technical Committee 181-EAS – Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, 2003, S.195-206.
- Weißbach 2012** Schutzrecht DE102011011805 A1, 23.08.2012, Raffael Weißbach.
- Wendelin 1991** Wendelin, T. J.; Jorgensen, G. J.; Wood, R. L.: SHOT: A Method for Characterizing the Surface Figure and Optical Performance of Point Focus Solar Concentrators. In: ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1991, S. 555-560.
- Wendelin 1995** Wendelin, T. J.; Grossmann, J. W.: Comparison of Three Methods for Optical Characterization of Point-Focus Concentrators. In: ASME Journal of Solar Energy Engineering 2, 1995, S. 775-780.
- Wiora 2001** Wiora, G.: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Universität Heidelberg, Universitätsbibliothek, urn:nbn:de:bsz:16-heidok-18088.
- Wood 1981** Wood, R. L.: Distant Observer Techniques for Verification of Solar Concentrator Optical Geometry. In: Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Paper No. UCRL-53220, 1981.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sören Müller

Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

1995 - 2004	Gymnasium am Römerkastell, Alzey, Abitur
2004 - 2005	Anderer Dienst im Ausland (Zivildienst)
2006 - 2009	Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule Karlsruhe mit der Vertiefungsrichtung „Konstruktiver Ingenieurbau“ und dem Abschluss „Diplom-Ingenieur (FH)“
2009 - 2010	Promotionseignungsprüfung an der Technischen Universität Kaiserslautern
2010 - 2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Kaiserslautern im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

bereits veröffentlicht wurden

- 1 Andreas Leffer: Zum Ermüdungsverhalten einbetonierter Kopfbolzendübel unter realitätsnaher Beanspruchung im Verbundbrückenbau
ISBN 3-89821-268-9
264 S.; erschienen am 30.06.2003 € 25,-
- 2 Ian Quirke: Beitrag zum Trag- und Verformungsverhalten von Rahmeninnenknoten aus Stahlbeton
ISBN 3-89821-344-7
226 S.; erschienen am 26.02.2004 € 25,-
- 3 Viktor Mechtcherine: Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung
ISBN 3-89821-583-0
133 S.; erschienen am 20.10.2005 € 25,-
- 4 Girma Zerayohannes: Bemessungsdiagramme für schiefe Biegung mit Längskraft nach DIN 1045-1:2001-07
270 S.; erschienen am 26.02.2006 € 25,-
- 5 Christian Gilcher: Numerische Simulation der schädigungswirksamen Beanspruchungsverläufe von Kopfbolzendübeln im Verbundbrückenbau unter natürlicher Verkehrsbeanspruchung
ISBN 3-89821-671-3
189 S.; erschienen am 15.03.2007 € 25,-
- 6 Herbert Knaus: Trag- und Verformungsverhalten von Kastenträgern aus nachgiebig verbundenen Holzelementen unter Biege- und Torsionsbeanspruchung
ISBN 978-3-939432-42-5
238 S.; erschienen am 04.05.2007 € 25,-
- 7 Christian Kohlmeyer: Beitrag zum Tragverhalten von Verbundträgern im Bereich von großen Stegöffnungen unter besonderer Berücksichtigung der Querkrafttragfähigkeit des Stahlbetongurts
ISBN 978-3-939432-63-0
276 S.; erschienen am 28.04.2008 € 25,-
- 8 Torsten Weil: Zum Tragverhalten von durchlaufenden Verbundträgern mit großen Stegöffnungen
ISBN 978-3-939432-61-6
224 S.; erschienen am 18.03.2008 € 25,-
- 9 Wolfgang Breit, Wolfgang Kurz, Jürgen Schnell: Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures and Material Technology
ISBN 978-3-939432-73-9
116 S.; erschienen am 14.05.2008 € 25,-
- 10 Ake Chopradub: Zur Tragfähigkeit von punktförmig gestützten filigranen Fassadenplatten aus faserverstärktem Feinkornbeton
191 S.; erschienen am 15.03.2010 € 25,-
- 11 Robert Kautsch: Beitrag zur Nachweisführung querkräftbewehrter Stahlbeton- und Spannbetonquerschnitte unter kombinierter Biege- und Schubbeanspruchung auf Grundlage der Erweiterten Technischen Biegelehre
ISBN 978-3-941438-47-7
274 S.; erschienen am 30.08.2010 € 25,-

- | | | |
|----|--|--------|
| 12 | Florian Peter Ackermann: Zum Tragverhalten von durchlaufenden stahlfaserbewehrten Stahlverbunddecken
ISBN 978-3-941438-48-4
301 S.; erschienen am 27.09.2010 | € 25,- |
| 13 | Alexander Markus Fischer: Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte zur semiprobabilistischen Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand
ISBN 978-3-941438-57-6
384 S.; erschienen am 06.01.2011 | € 30,- |
| 14 | Christopher Kessler: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation des nichtlinearen Tragverhaltens geklebter Stahl-Beton-Verbindungen
ISBN 978-3-943995-09-1
298 S.; erschienen am 22.10.2012 | € 30,- |
| 15 | Christian Balzer: Zum Einfluss von Dübelleisten auf das Querkraftverhalten des Stahlbetongurts von Verbundträgern im Bereich von großen Stegöffnungen
ISBN 978-3-943995-12-1
227 S.; erschienen am 20.12.2012 | € 25,- |
| 16 | Markus Loch: Beitrag zur Bestimmung von charakteristischen Werkstofffestigkeiten in Bestandtragwerken aus Stahlbeton
ISBN 978-3-943995-53-4
175 S.; erschienen am 01.06.2014 | € 25,- |
| 17 | Christian Albrecht: Bemessung von Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern und ein Beitrag zum besseren Verständnis der Querkrafttragfähigkeit
ISBN 978-3-943995-52-1
269 S.; erschienen am 01.06.2014 | € 25,- |
| 18 | Wolfgang Breit, Christian Kohlmeyer, Wolfgang Kurz, Dirk Lorenz, Matthias Pahn, Jürgen Schnell, Catherina Thiele: Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures, Material Technology and Structural Fire Protection
ISBN 978-3-943995-59-6
202 S.; erschienen am 01.07.2014 | € 25,- |
| 19 | Simon Hartmeyer: Modell zur Beschreibung des Querkrafttragverhaltens von Stahlverbunddecken aus Leicht- und Normalbeton
ISBN 978-3-943995-70-1
242 S.; erschienen am 01.02.2015 | € 25,- |
| 20 | Frank Antonius Müller: Sandwichelemente mit Deckschichten aus Hochleistungsbeton und einem Kern aus extrudiertem Polystyrol
ISBN 978-3-943995-89-3
299 S.; erschienen am 01.07.2015 | € 30,- |
| 21 | Florian Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau
ISBN 978-3-95974-004-3
272 S.; erschienen am 01.01.2016 | € 30,- |
| 22 | Sören Müller: Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke
ISBN 978-3-95974-017-3
195 S.; erschienen am 01.05.2016 | € 30,- |