



TABSOLAR – Solarabsorber und andere thermisch aktive Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)

Förderkennzeichen: 03ET1117A/C/D
Projektlaufzeit: 1.10.2012-30.9.2014



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Autorinnen und Autoren:

Dr.-Ing. Michael Hermann (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. Lotta Koch (Fraunhofer ISE)
Dr. rer. nat. Carmen Jerg (Fraunhofer ISE)
Dr.-Ing. Doreen Kalz (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. Dominik Wystrcil (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. Eric Laurenz (Fraunhofer ISE)
Dr.-Ing. Christoph Maurer (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. (FH) Susanne Spürgin (Spürgin)

Richard Riske (Spürgin)
Dipl.-Betriebsw. Nikolaus Günthner (Spürgin)
Dr.-Ing. Thomas Teichmann (G.tecz)
Dipl.-Ing. Tino Sablotny (G.tecz)
Friedrich A. Roell (Visiotex)
Dipl.-Ing. (FH) Gerd Sexauer (Zehnder)
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Porsche (Zehnder)
Dr.-Ing. Iwiza Tesari (Karlsruher Institut für Technologie KIT)

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Einleitung.....	5
1.1	Ziele.....	6
1.2	Daten	7
1.3	Konsortium	7
1.4	Ausgangssituation/Stand der Technik.....	8
1.5	Projektdurchführung	10
2	Projektergebnisse	10
2.1	Materialentwicklung.....	10
2.1.1	UHPC-Entwicklung	10
2.1.2	Materialkombinationen UHPC/Textilien	14
2.1.3	Beschichtung von UHPC mit Epoxidharz und Wasserglas	15
2.2	Materialuntersuchungen.....	17
2.2.1	Materialeigenschaften von UHPC	17
2.2.2	Temperaturschock- und Korrosionstests	17
2.2.3	Dampfdiffusionsmessungen.....	18
2.3	Komponentenentwicklung	21
2.3.1	Strukturmechanische Simulationen	21
2.3.2	Thermische Simulationen.....	36
2.4	Fertigungstechnologie – Membran-Vakuumtiefziehverfahren.....	42
2.4.1	Auslegung der Kanalstrukturen.....	43
2.4.2	Fertigung und Bau eines Werkzeugs	46
2.4.3	Herstellung von Mustern	47
2.4.4	Planungen zur Fertigung eines 2-m ² -Moduls	51
2.5	Fertigungstechnologie – Umgießen von 3D-Textilien.....	51
2.5.1	Auslegung der Kanalstrukturen.....	51
2.5.2	Herstellung von 3D-Textilien	52
2.5.3	Befüllen von 3D-Textilien	54
2.5.4	Herstellung von Mustern	56
2.6	Spektralselektive Beschichtung.....	58
2.6.1	Direkte Beschichtung auf UHPC	59

2.6.2	Beschichtung auf anderen Substraten	71
2.7	Nichtselektive Beschichtung mit kommerziellen Solarfarben	74
2.8	Konzeption von TABSOLAR-Elementen	77
2.8.1	Feuchtehaushalt und Wärmedämmung.....	77
2.8.2	Austauschbarkeit.....	83
2.8.3	Anschlusskonzepte.....	83
2.9	Systembetrachtungen.....	85
2.9.1	Systemkonzepte für TABS.....	85
2.9.2	Systemsimulationen für Fassadenkollektoren	85
2.9.3	Ökobilanz/Life-Cycle-Analysis (LCA).....	90
2.10	Versuche und Messungen.....	93
2.10.1	Durchströmungsversuche mit Thermografieaufnahmen	93
2.10.2	Leistungsmessungen am Heizkörperstand.....	95
2.11	Verwendung der Fördermittel.....	98
2.12	Verwertung.....	98
2.13	Öffentlichkeitsarbeit und Vermarktung	99
2.13.1	Veröffentlichungen und Messeexponat	99
2.13.2	Produktperspektiven.....	101
3	Zusammenfassung und Ausblick	102
4	Danksagung.....	105
5	Abbildungsverzeichnis	106
6	Tabellenverzeichnis	113
7	Literaturverzeichnis.....	115

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund einer klima- und umweltverträglichen Energieversorgung strebt die Bundesregierung eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an. Im Gebäudesektor kann thermische Solarenergie hier einen wesentlichen Beitrag leisten. Darüber hinaus ermöglichen thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) aufgrund großer Flächen und damit geringer Temperaturniveaus die Realisierung von Niedrigexergiesystemen (LowEx-Systemen), mit denen sich sehr energieeffiziente Gebäude realisieren lassen und die der Nutzung erneuerbarer Energien besonders dienlich sind.

Das Verbund-Forschungsvorhaben TABSOLAR diente als Grundlagenprojekt für den Ansatz, multifunktionale Niedertemperatur-Bauteile in Form von Wänden, Decken oder Böden für Neu- und Altbauten zu entwickeln, die mechanische (z. B. tragende Wand), thermisch aktive (von Fluid durchströmt), thermisch passive (Wärmedämmung) sowie gestalterische Funktionalität (Struktur, Farbe, Beschichtung) aufweisen. Basis ist ein Ultrahochleistungsbeton (Ultra High Performance Concrete, UHPC), der per se bereits zu sehr filigranen, Material sparenden und gleichzeitig hochfesten Bauteilen führen kann.

Als Vision eines späteren Produkts wurde zu Projektbeginn eine vollständig vorgefertigte tragende Wand skizziert, die auf der Außenseite einen spektralselektiv beschichteten, vor Ort zu verglasenden durchströmten Absorber aufweist, in ihrem Kern wärmedämmt ist und auf der Innenseite eine weitere Kanalstruktur enthält und damit als Wandflächenheizung fungieren kann (Abbildung 1).

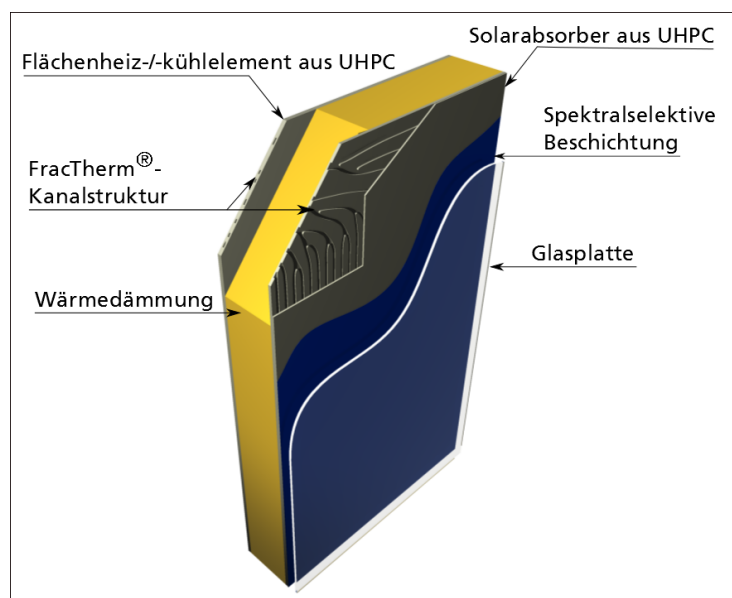


Abbildung 1: Vision eines multifunktionalen TABSOLAR-Elements

Weitere Ausgestaltungen mit Teilfunktionen (z. B. Solarkollektor, Kühldecke, Design-Flächenheizkörper, ...) sind ebenso möglich und sinnvoll und erwiesen sich im Lauf des Projekts perspektivisch als erste realisierbare Produktentwicklungen. Alternativ zum spektralselektiven, abgedeckten Solarabsorber sind auch unabgedeckte Absorber für Niedertemperaturanwendungen – z. B. als Wärmequelle für eine Wärmepumpe – möglich. Im Falle einer Altbausanierung könnte das Bauteil entweder eine bestehende Wand vollständig substituieren oder aber auf diese aufgebracht werden und dabei den Vorteil einer sehr kompakten Bauweise geltend machen.

1.1 Ziele

Ziel des Projekts war es, gemeinsam mit Experten aus den Bereichen Architektur, Bauphysik, Solarthermie, HLK, Material- und Fertigungstechnologie (UHPC, Betonfertigteile, 3D-Textilien, Flächenheiz- und Kühlelemente) aus dem innovativen Material UHPC durchströmbare und damit thermisch aktivierbare Musterbauteile zu entwickeln, die Grundlage eines Solarabsorbers oder eines Flächenheiz- oder -kühlelements sein können. Gemeinsam mit oben genannten Projektpartnern waren folgende Schritte dazu geplant worden:

- Analyse des Stands der Technik
- Entwicklung geeigneter UHPC
- Untersuchung zweier möglicher Herstellverfahren:
 1. Ein vom Fraunhofer ISE patentiertes Membran-Vakuumtiefziehverfahren, das bereits erfolgreich mit einer Gießkeramik exemplarisch erprobt worden war, sowie
 2. eine Kombination aus dreidimensionalem Weben/Wirken/Stricken (WOVENIT-Verfahren) und anschließendem Umgießen (Textilbeton).
- Auslegung und Fertigung von strukturoptimierten Funktionsmustern
- Beschichtung von Musterbauteilen mit verschiedenen Schichten (z. B. spektralselektiv/nichtselektiv, verschiedene Farben)
- Charakterisierung und Evaluierung der Musterbauteile

Für den Entwurf der Kanalstrukturen wurde das vom Fraunhofer ISE patentierte bionische FracTherm®-Verfahren gewählt (mehrfach verzweigte, „fraktale“ Strukturen wie z. B. bei Blutbahnen oder in Blättern, [1], [2], [3]), das bereits mit anderen Fertigungsverfahren erfolgreich umgesetzt worden war. Mit diesem Verfahren können nahezu beliebige Formen mit einem gleichmäßig durchströmten Kanalnetzwerk versehen werden (z. B. für Fachwerkhäuser).

Durch Anwenden von Verfahren der Strukturoptimierung nach bionischen Prinzipien sollte der Materialaufwand auf ein Minimum reduziert werden.

Die Fertigungsverfahren basieren auf kalten Gießprozessen, die ein hohes Maß an Flexibilität erlauben – z. B. auch integrierte 3D-Strukturen – und mit geringen Werkzeugkosten und niedrigem Energiebedarf auskommen. Dadurch sind sowohl wirtschaftliche Serienprodukte als auch individuelle Fertigbauteile für anspruchsvolle Architekturprojekte denkbar.

1.2 Daten

Laufzeit : 01.10.2012-30.9.2014
Gesamtbudget : 1,70 Mio. €
BMW-Zuwendung : 1,24 Mio. €
Förderquote : 73 %

1.3 Konsortium

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

(Verbundpartner, Koordinator)

Heidenhofstraße 2

79110 Freiburg

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Michael Hermann

Betonfertigteile Spürgin GmbH & Co. KG

(Verbundpartner)

Gottlieb-Daimler-Straße 4/7

79331 Teningen

Ansprechpartnerin: Dipl.-Ing. (FH) Susanne Spürgin

G.tecz Engineering UG (haftungsbeschränkt)

(Unterauftragnehmer von Fa. Spürgin)

Angersbachstr. 12b

34127 Kassel

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Thomas Teichmann

Visiotex GmbH

(Verbundpartner)

Wegenerstraße 13

89231 Neu-Ulm

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Friedrich A. Roell

Zehnder GmbH

(Industriepartner, nicht gefördert)
Almweg 34
77933 Lahr

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. (FH) Gerd Sexauer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

(Unterauftragnehmer von Fraunhofer ISE)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Iwiza Tesari

1.4 Ausgangssituation/Stand der Technik

Thermische Solarkollektoren nach dem Stand der Technik basieren in der Regel auf metallischen Absorbern, die in wärmeisolierte Gehäuse eingebaut und von einer Glasscheibe abgedeckt sind. Auch kostengünstigere Polymerkollektoren geraten zunehmend in den Fokus des Interesses, jedoch stellt die Temperaturbeständigkeit der Materialien dort eine nicht unwesentliche Hürde dar. Große Kollektorfelder sind inzwischen weit verbreitet; dazu gehören auch Fassadenkollektoren. Bei gleichzeitiger Nutzung von Photovoltaik an einem Gebäude ist es zunehmend interessant, Fassaden für die Solarthermie zu nutzen, zumal dadurch sommerliche Stagnation reduziert und gleichzeitig der Kollektorertrag im Winter erhöht werden kann. Für PV-Anlagen wiederum ist ein geringerer Neigungswinkel wegen des höheren Sonnenstandes im strahlungsreichen Sommer vorteilhaft. Fassadenkollektoren nach dem Stand der Technik sind in der Regel additive Komponenten, die an der Außenwand befestigt werden. Ebenso werden in Gebäuden Flächenheiz- und/oder Kühlelemente auf bestehende Wände, Fußböden oder Decken aufgebracht und lediglich in den Putz bzw. Estrich integriert.

Der Projektansatz verfolgte dagegen das Ziel, ein integrales Bauteil zu entwickeln, das mit minimalem Material- und Energieeinsatz eine höchstmögliche Funktionalität erhält. Auch sehr filigrane abgehängte Konstruktionen für Deckenheiz- bzw. -kühlelemente sollten damit möglich sein.

Das erwähnte FracTherm[®]-Verfahren war bereits für Solarabsorber und andere Anwendungen eingesetzt und entsprechende Bauteile erfolgreich gefertigt worden. Beispiele für abgeschlossene Projekte dazu sind das EU-Projekt

„BIONICOL“ (TREN/FP7EN/219036/„BIONICOL“, [4]) sowie das deutsche FOSTA/ZUTECH-Projekt STAHLABS (P820/18/2009 / IGF-Nr. 339 ZN, [5], [6]).

Das patentierte Membran-Vakuumtiefziehverfahren war bereits lang vor dem Projekt am Fraunhofer ISE entwickelt und mit einer kalt aushärtenden Gießkeramik getestet worden, jedoch waren bis zum Projektbeginn keine weiteren Arbeiten dazu durchgeführt worden. Das zweite Herstellverfahren existierte vor dem Projekt nur als Idee; es war aber bereits erfolgreich eine „Thermoweste“ mit FracTherm®-Kanalstruktur durch ein zweidimensionales Webverfahren hergestellt worden, so dass damit eine ähnliche textile Basistechnologie wie im Projekt geplant bereits exemplarisch umgesetzt worden war.

Zum Thema Ultrahochleistungsbeton (UHPC) existierte bereits vor Projektbeginn ein laufendes DFG-Schwerpunktprogramm „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ (SPP1182), bei dem jedoch weder die Projektpartner involviert waren noch die Ziele des Projektvorhabens verfolgt wurden. Des Weiteren existierte ein Forschungsprojekt des Forschungskollegs bri.dge-group, in dem ein so genannter „Hybridbaustein“ aus UHPC für den Bausektor entwickelt werden sollte. Dieser Baustein enthielt jedoch keine direkt eingebrachten Fluidkanäle. Er sollte vielmehr Grundelement eines Baukastensystems bilden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Nutzung von Beton ist das Thema „Nachhaltigkeit“. Klassische Betonkonstruktionen sind mitunter wegen der schlechten Primärenergie- bzw. CO₂-Bilanz in die Kritik geraten. Bei dem im Projektvorhaben angestrebten Ansatz wurde eine deutlich bessere Primärenergiebilanz als beim Stand der Technik erwartet, was vor allem auf das Material UHPC, die geringere zu transportierende Masse, Strukturoptimierung und Synergieeffekte durch die Multifunktionalität zurückzuführen sein sollte. Es war anzunehmen, dass durch die genannten Aspekte neben den ökologischen auch ökonomische Vorteile erreicht werden können. Des Weiteren könnten potenzielle Produkte z. B. durch die Möglichkeit kostengünstiger solarer Bestandssanierung und/oder eine hohe ästhetische Qualität auch eine wesentliche soziale Komponente beinhalten. Eine konkrete Analyse der Nachhaltigkeit hätte den Rahmen dieses Projektvorhabens gesprengt. Jedoch wurde angestrebt, relevante Daten und Eigenschaften der Komponenten bereits während des Projekts zu sammeln, um eine solche Analyse in nachfolgenden oder begleitenden Projekten durchführen zu können.

1.5 Projektdurchführung

Im Laufe des Projekts fanden insgesamt sechs Projekttreffen des Gesamtkonsortiums statt, drei davon in Freiburg und jeweils eines in Kassel, Wismar und Teningen. Darüber hinaus gab es Arbeitstreffen im kleineren Kreis, z. B. zur Musterfertigung im Labormaßstab in Kassel oder zur Vorbesprechung der Fertigung größerer Bauteile in Teningen.

2 Projektergebnisse

2.1 Materialentwicklung

Die Materialentwicklung stellte eine wesentliche Aufgabe dar, um das TABSOLAR-Konzept realisieren zu können, insbesondere die Entwicklung von UHPC mit für die Fertigungsprozesse geeigneten rheologischen Eigenschaften.

2.1.1 UHPC-Entwicklung

Im Rahmen des Forschungsprojektes TABSOLAR wurde die Anwendung von UHPC für durchströmbare Bauteile untersucht. Für die durchzuführenden Versuche wurde eine Standard-UHPC-Rezeptur von G.tecz verwendet, welche im Laufe des Projektes adaptiert wurde. Mit Hilfe der Standardrezeptur wurden zunächst plattenartige Bauteile für Vorversuche hergestellt. Hier konnten die Anforderungen an den UHPC und geometrische Parameter innerhalb eines repräsentativen Modellkreislaufs untersucht werden (siehe Abschnitt 2.2.2). Diese Vorversuche berücksichtigen unterschiedliche Betriebszustände eines Kollektors. Kritisch ist hierbei die Temperaturschockbelastung. Bei diesem Testszenario wird in einen aufgeheizten Kollektor bei Stagnationszustand ein Nebenkreislauf geöffnet und kalte Flüssigkeit eingeleitet. Infolge der Temperaturdifferenz zwischen dem aufgeheizten Bauteil und dem kalten Fluid treten hohe Randspannungen im Bauteil auf, welche zu Beschädigungen und somit zum Ausfall der Anlage führen können. Mit Hilfe des Modellkreislaufs wurden unterschiedliche Materialien und dessen Verträglichkeit untereinander getestet. Die wiederholten Temperaturschockversuche haben zu Rissen in den untersuchten Betonplatten geführt. Die getesteten Betonproben wurden zunächst ohne Fasern bei einer Plattenstärke von 4 mm ausgestattet. Aufgrund von durchgeführten Berechnungen wurde die Plattenstärke auf 8 mm erhöht. Zur Aufnahme von auftretenden Spannungen, insbesondere zur Reduktion von Schwindbelastungen

und Randspannungen, wurden Glasfasern mit einer Länge von 6 mm eingesetzt. Durch die Wiederholung des Tests mit 200 Wechselzyklen unter Verwendung optimierter Versuchskörper konnte eine Verbesserung der Versuchsergebnisse dargestellt werden. Die getesteten Versuchskörper weisen keine Schädigung der Bauteile infolge der Temperaturschockbelastung auf. Die folgende Abbildung 2 zeigt die getesteten Versuchskörper.

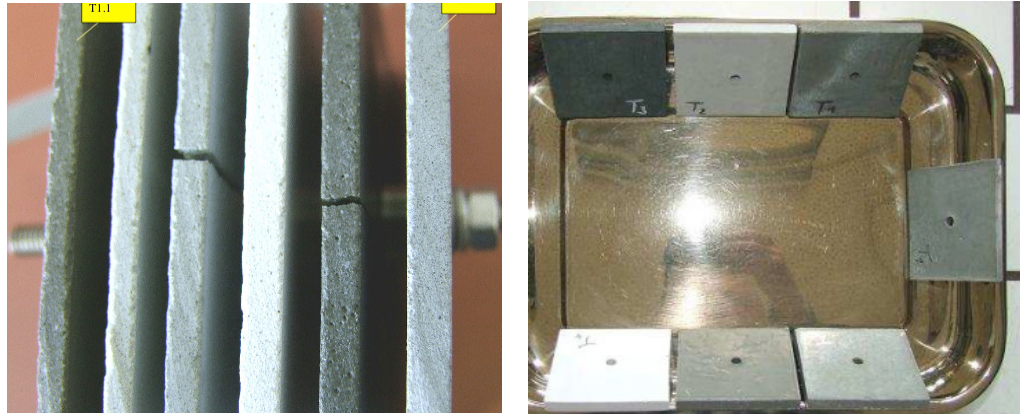


Abbildung 2: Links: getestete Platten mit 4 mm Stärke, rechts: getestete Platten mit 8 mm Stärke und Glasfasern ohne Schädigung

Anhand der durchgeführten Vorversuche und der erzielten Versuchsergebnisse wurde eine geeignete Versuchsmischung ausgewählt und für die nachfolgenden Versuche verwendet.

Die ausgewählte Mischungsrezeptur wurde verwendet, um weitere Versuchskörper herzustellen, welche nach definierten Zeitpunkten oberflächlich mit einer spektralselektiven Schicht besputtert wurden. Die Auswertung der ersten Messungen des Absorptions- und Emissionsgrads waren bereits überaus positiv zu bewerten. Die Messergebnisse wurden durch Vorversuche initiiert, bei denen unterschiedliche Oberflächenstrukturen und Ebenheiten der Betonoberfläche und dessen Einfluss auf Absorptions- und Emissionsgrad untersucht wurden. Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit der spektralselektiven Schicht auf der Betonoberfläche wurden Haftzugversuche am ISE durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wird ein Klebestreifen auf die auf den Beton aufbrachte spektralselektive Schicht aufgebracht und ruckartig abgezogen. Rückstände der spektralselektiven Schicht auf dem Klebestreifen wiesen auf Haftprobleme zwischen UHPC und spektralselektiver Schicht hin. Untersuchungen bei G.tecz mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) sowie der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) haben nachweislich auf einen gefügestörten und geschwächten Bereich des Betons hingewiesen, welcher durch den Aufbau

der Schalung verursacht wurde. Durch die Modifikation des Schalungssystems der Prüfkörper konnte der Haftverbund signifikant verbessert werden. Eine weitere Optimierung des Haftverbundes konnte durch die Anpassung des Applikationsverfahrens der spektralselektiven Schicht erreicht werden. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigt die untersuchten, beschichteten Probekörper vor und nach der Optimierung der Schalung.

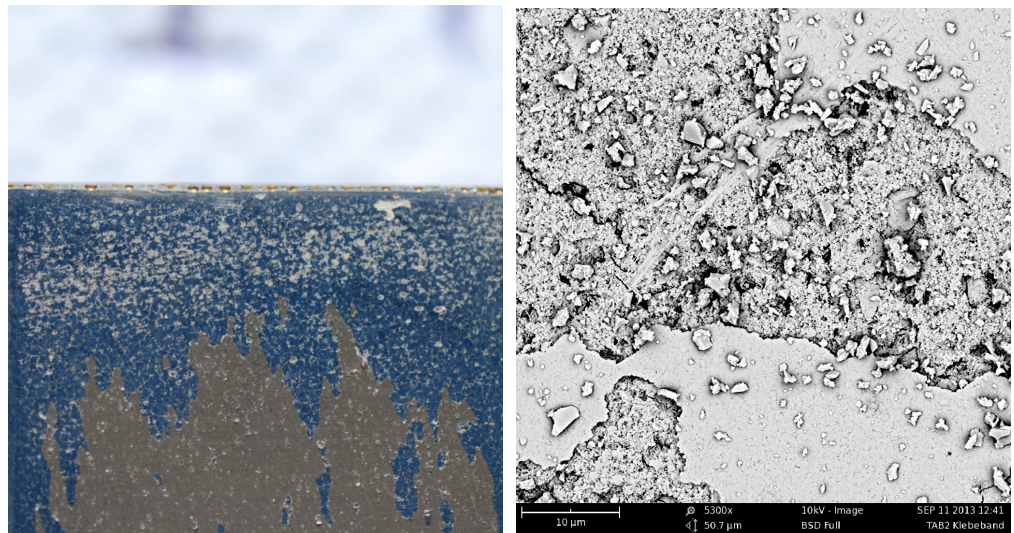


Abbildung 3: Links: abgelöste Areale der Beschichtung, rechts: REM-Aufnahme der gestörten Randbereiche des Betons

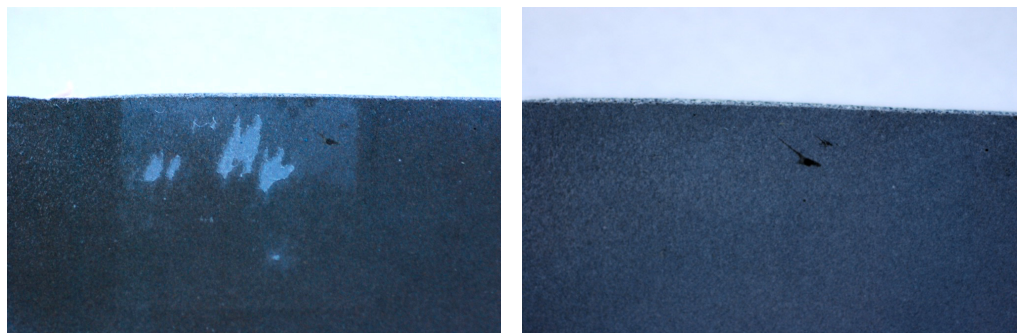


Abbildung 4: Links: geprüfte Betonoberfläche aus einer optimierten Schalung, rechts: Oberfläche zeigt nach der Reinigung von Klebstoffresten keine Ablösungen von der Oberfläche

Für weitere Untersuchungen und zur Herstellung von Mustern wurde die Mischungsrezeptur aus den Vorversuchen in Kombination mit der modifizierten Schalungstechnologie verwendet. Neben der Untersuchung von spektralselektiv beschichteten Proben wurden eingefärbte Betonproben untersucht, welche beispielsweise zur Herstellung von Fassadenplatten verwendet werden. In diesen Fällen wurde die UHPC-Rezeptur mit Pigmenten in der gewünschten Farbe eingefärbt. Wie zuvor dargestellt wurden auch bei diesen Versuchskörpern der Absorptions- und der Emissionsgrad gemessen (siehe Abschnitt 2.7).

Für die Herstellung durchströmbarer Bauteile wurde die zuvor eingesetzte Mischungsrezeptur modifiziert. Bedingt durch das eingesetzte Membran-Vakuumtiefziehverfahren bedarf es der Modifikation der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons. Hierbei müssen die Fließgrenze und die Viskosität des Frischbetons auf die Bedürfnisse und Produktionsabläufe zielgerichtet eingestellt werden. Der Frischbeton muss eine ausreichend hohe Fließgrenze aufweisen, um während und nach dem formgebenden Tiefziehprozess eine genügend hohe Formstabilität sicherzustellen um ein Abfließen des Frischbetons zu vermeiden. Weiter mussten im Rahmen der Versuche die Reproduzierbarkeit und die Praktikabilität untersucht werden.

Zunächst wurden Packungsdichte-, aber insbesondere Wasserfilmdickenberechnungen durchgeführt sowie Frischbetonviskositäten und das Fließverhalten im Labor untersucht. Die ersten Tiefziehversuche konnten erfolgreich durchgeführt werden und wurden im Laufe der Testreihen weiter angepasst. Das Ziel, die Mischungsrezeptur soweit zu modifizieren, dass diese für den Tiefziehprozess verwendet werden kann, wurde erfolgreich abgeschlossen. Die folgenden Abbildungen zeigen den Frischbeton vor und nach dem Tiefziehprozess. Wie in Abbildung 5 bis Abbildung 7 dargestellt können die Konturen der Schalung im Frisch- und Festbeton erfolgreich abgebildet werden.

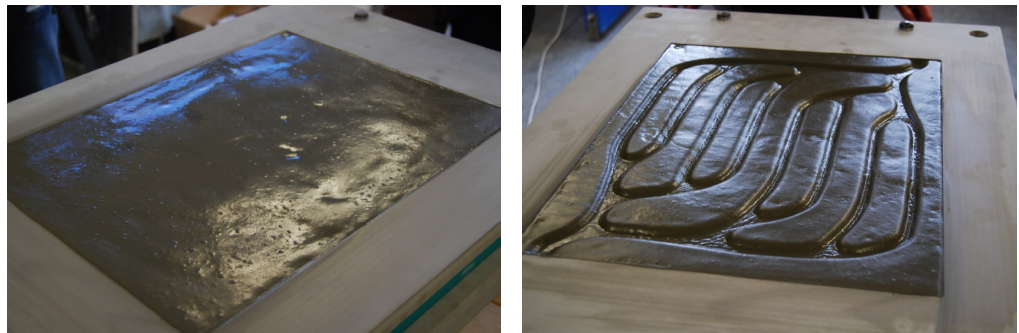


Abbildung 5: Links: eingebrachter Frischbeton vor dem Tiefziehen, rechts: tiefgezogener Frischbeton

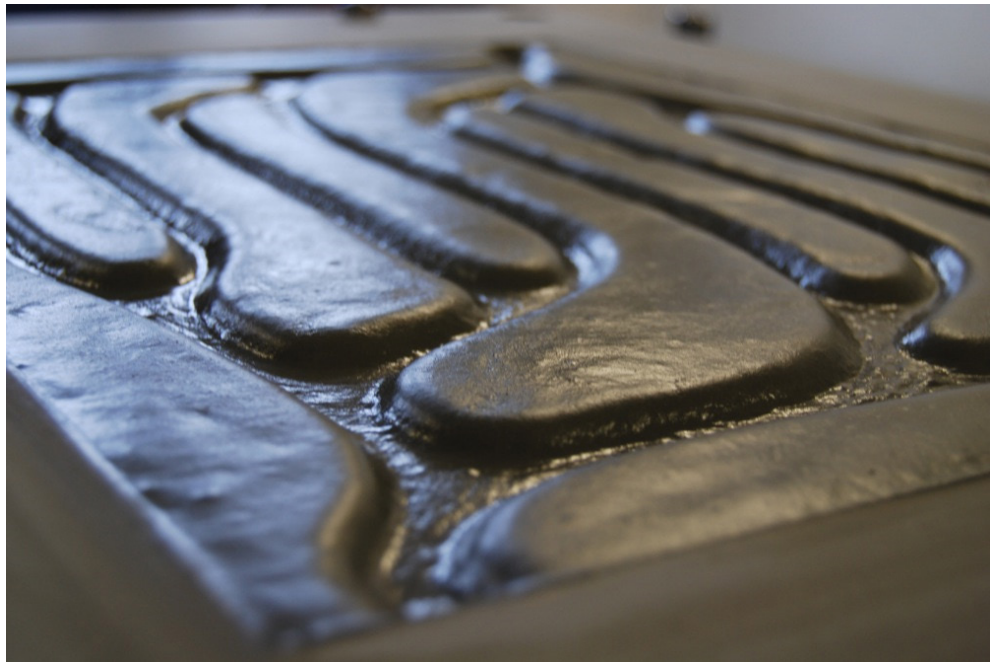


Abbildung 6: Detail des tiefgezogenen Frischbetons

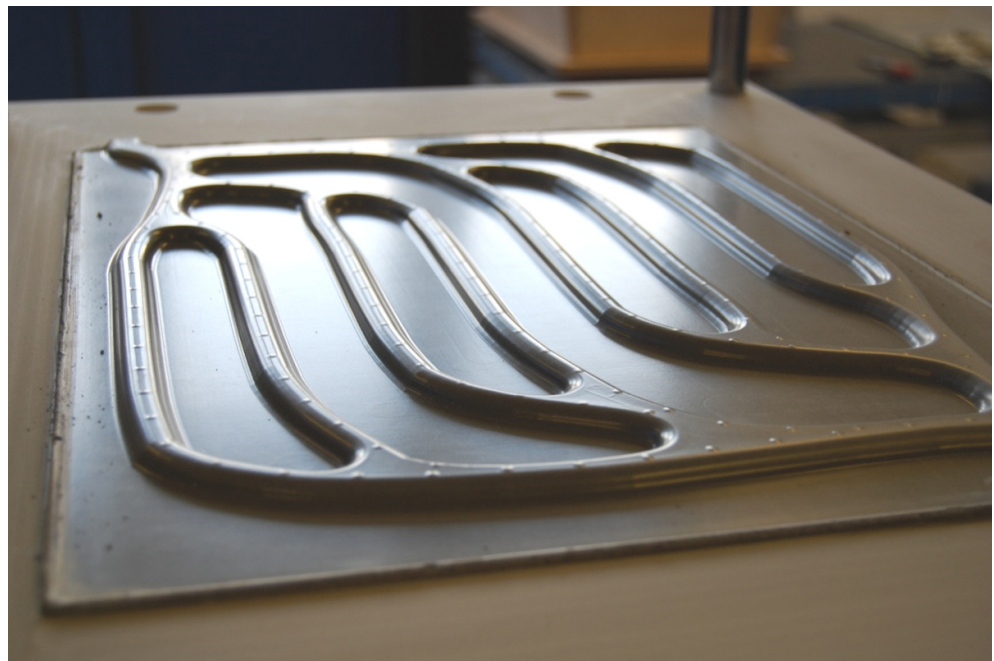


Abbildung 7: Ausgeschaltes, tiefgezogenes Bauteil

2.1.2 Materialkombinationen UHPC/Textilien

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Gewebe und UHPC wurden Versuche mit unterschiedlichen Geweben der Firma Visiotex bei G.tecz durchgeführt. Zunächst wurde von Visiotex die grundsätzliche Verarbeitung aller gängigen Fasern (Polyamid, Polyester, Aramid, Glas, ...) in Kombination mit unterschiedlichen Bindungen (Maschenstrukturen) getestet. Nach notwendiger Adaption der Fadenleitelemente konnten auch unterschiedliche Bindungen aus

verschiedenen Hybridfasern gefertigt werden. Mit unterschiedlichen Präparationen im Nassverfahren und einer Oberflächenaktivierung im Vakuumplasma konnte die Oberfläche des Fadens/Textils aktiviert und die Verbindung zum UHPC verbessert werden. Wie auch bei den vorherigen Versuchen wurden die Gewebe in eine Schalung eingelegt und mit Frischbeton übergossen und anschließend im Alter von 28 d geprüft (Abbildung 8). Hierbei wird das Verbundverhalten zwischen Gewebe und Beton untersucht, um eine Steigerung der mechanisch aufnehmbaren Last des Betons zu erreichen. Bei Versuchen mit Glasfasergeweben konnte eine Lastaufnahme oberhalb des Matrixbruchs des Betons gemessen werden. Die übrig untersuchten Gewebetypen erreichten lediglich Messwerte unterhalb der Matrixfestigkeiten. Bei einigen Versuchsreihen konnte ein Absinken der Matrixfestigkeit dokumentiert werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Anmachwasser aus dem Beton vom Gewebe aufgenommen wird und nicht mehr zur Festigkeitsbildung des Betons zur Verfügung steht.



Abbildung 8: Verbunde aus Gewebe von Fa. Visiotex und UHPC von Fa. G.tecz

2.1.3 Beschichtung von UHPC mit Epoxidharz und Wasserglas

Um dampfdiffusionsdichte Kanäle und eine Optimierung von deren Querschnittsgeometrie zu erhalten, wurden Untersuchungen zur Innenbeschichtung der Kanalstrukturen innerhalb eines TABSOLAR-Elements durchgeführt. Hierbei werden Areale, an denen kritische Kerbspannungen auftreten, mit Epoxidharz oder Wasserglas aufgefüllt, um den Querschnitt auszurunden und somit Spannungsspitzen zu minimieren. Bei den durchgeführten Versuchen wurde Epoxidharz in die Kanalstrukturen eingefüllt und anschließend wieder abgelassen. Aufgrund der Viskosität und des Fließverhaltens des verwendeten Epoxidharzes verbleibt ein Film an den Wandungen der Kanalstrukturen. Das Versuchsschema

ist in Abbildung 9 und die ausgekleideten Kanalquerschnitte sind in Abbildung 10 dargestellt.

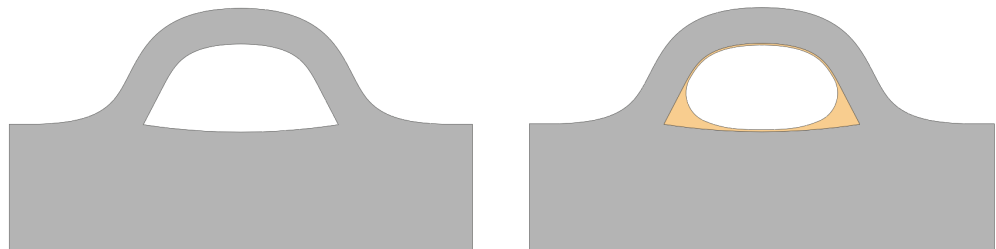


Abbildung 9: Aufbau der Wandungsbeschichtung mittels Epoxidharz

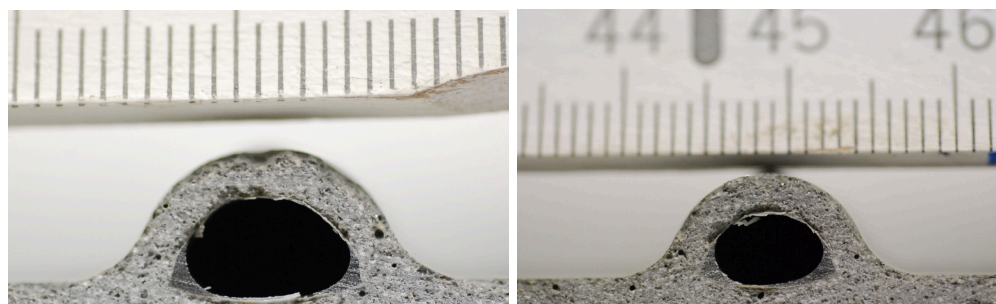


Abbildung 10: Mit Epoxidharz ausgekleidete Kanalwände

Bedingt durch das Reaktionsverhalten des verwendeten 2-komponentigen Epoxidharzes muss dieses nach dem Verguss der Kanalstrukturen entsorgt und kann nicht wiederverwendet werden. Eine Alternative ist die Verwendung von Wassergläsern. Das eingebrachte Wasserglas interagiert mit dem jungen Beton und bildet eine Verbindung zwischen UHPC und der Beschichtung. Überschüssiges Wasserglas kann nach dem Fluten der Kanäle im Gegensatz zu Epoxidharz wiederverwendet werden.

Weiter wurde Wasserglas verwendet, um eine Grundlage für die spektralselektive Beschichtung zu erzeugen. Hierbei wurde die zu beschichtende Betonoberfläche mit Wasserglas geflutet. Im Laufe der Versuche hat sich herausgestellt, dass die für den Sputterprozess notwendige Temperaturbehandlung die hier eingesetzte Wasserglasschicht zerstört. Hier ist eine vorherige Wärmebehandlung des mit Wasserglas beschichteten Betonbauteils mit möglichst niedriger Maximaltemperatur und verlängerten Aufheizzeiten nötig. Ziel ist es, das im Wasserglas enthaltene Wasser zu evakuieren, um eine Expansion aus Wasserdampf zu vermeiden. Das zu verwendende Temperaturregime ist jedoch kos-

ten- und zeitintensiv und wurde zunächst nicht weiter untersucht. In weiteren Versuchen ist das Abbindeverhalten eingesetzter Wassergläser weiter zu untersuchen und nach Möglichkeit zu modifizieren.

2.2 Materialuntersuchungen

Im Hinblick auf die Auslegung und Funktionalität von TABSOLAR-Elementen kamen Materialuntersuchungen in Form von Versuchen und Messungen eine besondere Bedeutung zu.

2.2.1 Materialeigenschaften von UHPC

Für die Komponenten- und Systemsimulationen war die Kenntnis der Materialeigenschaften unerlässlich. Am Fraunhofer ISE wurden von G.tecz hergestellte Proben mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) und Laser Flash Analysis (LFA) untersucht. Die Temperaturleitfähigkeit a , die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte ρ wurden gemessen; hieraus konnte die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet werden. Die Werte können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Thermische Eigenschaften der untersuchten UHPC Proben

Spezifische Wärmekapazität c_p bei 20 °C	0,75 kJ/(kgK)
Spezifische Wärmekapazität c_p bei 100 °C	0,87 kJ/(kgK)
Dichte ρ	2,4 ± 0,1 g/cm ³
Wärmeleitfähigkeit λ	2,66 W/mK - 2,69 mW/mK ² · T

2.2.2 Temperaturschock- und Korrosionstests

Zur Untersuchung des Verhaltens von UHPC im Kontakt mit Solarflüssigkeiten wurden zu Beginn des Projekts Tests vom Forschungs- und Qualitätszentrum Oderbrücke gGmbH im Unterauftrag des Fraunhofer ISE durchgeführt. Zunächst wurden mehrmalige Temperaturschocktests an 4 mm dicken Proben durchgeführt (Aufheizen auf 350 °C/Abschrecken mit kaltem Wasser). Dabei kam es in den Aufheizphasen nach dem Abschrecken zu Mikrorissen bzw. Brüchen. Versuche zur Wasseraufnahmefähigkeit zeigten eine deutliche Wasseraufnahme; bei der Verwendung von Solarflüssigkeit war die Aufnahme allerdings nur gering. Bei der anschließenden Trocknung zeigte sich ein Masseverlust. In einer weiteren Versuchsreihe wurden 8 mm dicke Proben untersucht und vorher einer Wärmebehandlung unterzogen. Dabei war bei Temperaturen

über 200 °C eine starke Geruchsbildung festzustellen. Als Ursache wird die Zersetzung einer im UHPC enthaltenen organischen Substanz vermutet. Diesmal traten bei den Temperaturschocktests keine Mikrorisse oder Spalte auf. Bei einem Bruchfestigkeitstest von 4 mm dicken Proben (zyklische Temperaturbelastungen bis 280 °C; 110 Zyklen) traten Beschädigungen auf.

In einer zweiten Testphase wurden Korrosionsuntersuchungen unter Stagnationsbedingungen (Verdampfung der Flüssigkeit) mit 4 mm und 8 mm dicken Proben in Kombination mit unterschiedlichen Metallen und Solarflüssigkeit durchgeführt (zyklische Temperaturbelastungen bis 240 °C, 220 Zyklen). Auf den rauen Oberflächen der Rückseiten der UHPC-Proben zeigten sich schwarze Ablagerungen, nicht jedoch auf den glatten Vorderseiten. Es traten Mikrorisse auf (vermutlich begünstigt durch Nachverdampfung der Flüssigkeit). Nach den Versuchen verblieben weißgraue Partikel geringer Festigkeit, die auf chemische Reaktionen während des Testlaufs zurückzuführen sind. G.tecz ist jedoch zuversichtlich, die Probleme durch Variation der UHPC-Zusammensetzung zu beheben.

2.2.3 Dampfdiffusionsmessungen

Es wurden Untersuchungen zum Diffusionsverhalten von UHPC durchgeführt. Hierzu wurde nach verschiedenen Vorversuchen mit anderen Apparaturen ein Vakuum-Heliumlecktester (Pfeiffer Vacuum/Adixen ASM Graph) verwendet. Damit kann direkt der Heliummassenstrom bei einer definierten Druckdifferenz durch eine UHPC-Probe gemessen werden. Der prinzipielle Probenaufbau und -anschluss ist in Abbildung 11 skizziert.

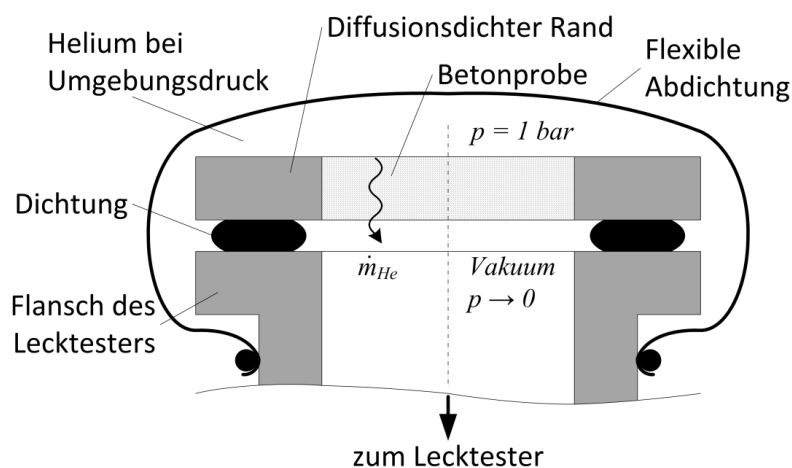


Abbildung 11: Skizze des Probenaufbaus zur Messung der Heliumdiffusion

Aus der gemessenen Heliumdiffusion kann das Verhalten für den Fall abgeschätzt werden, dass der Kollektor innen mit 100 °C heißem Wasser durchströmt wird und außen Umgebungsluft anliegt. Dabei beträgt die Partialdruckdifferenz (treibende Kraft der Dampfdiffusion) 1 bar.

Als Herausforderung stellte sich der dichte Anschluss der UHPC-Probe heraus. Dieser war nötig, um ein Verfälschen der Messung durch seitliche Leckageströme auszuschließen. Die nach mehreren Vorversuchen als praktikabel identifizierte Probenvorbereitung ist in Abbildung 12 gezeigt. Hierzu wurden von G.tecz passende zylindrische UHPC-Proben (Coupons) hergestellt. Zum Vergleich wurde die ebenfalls in Abbildung 12 dargestellte Referenz aus reinem Epoxidharz gefertigt.



Abbildung 12: In Epoxidharz bzw. Klebstoff eingegossene UHPC und Referenz aus Vollharz

Bei der Vorbereitung der ersten Proben (Nov 2013) war ein teilweises Benetzen der Probenunterseite mit Harz nicht zu vermeiden. Die Probe musste daher von Fa. G.tecz an dieser Seite abgeschliffen werden, um eine Beeinträchtigung der Messung auszuschließen. Bei den weiteren Proben konnte ein solches Benetzen vermieden werden.

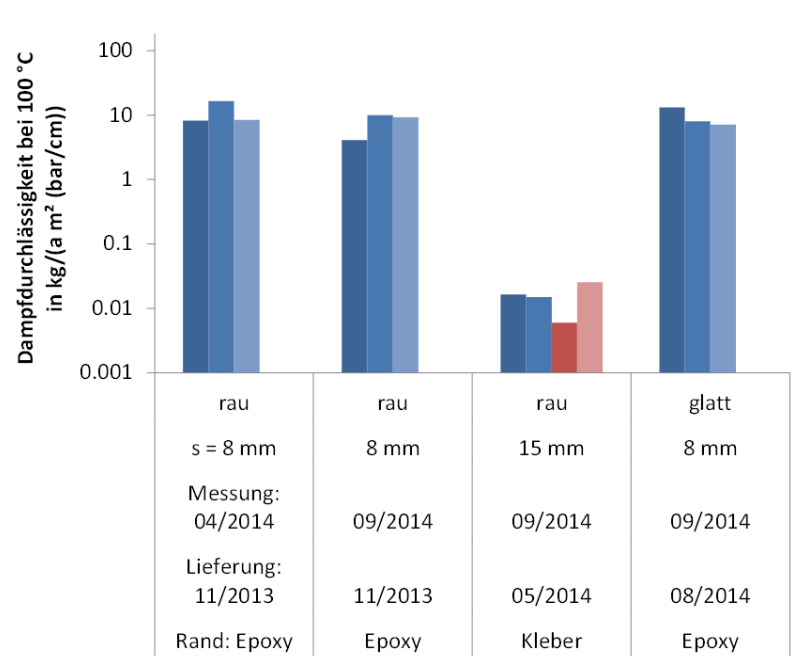


Abbildung 13: Ergebnisse der Dampfdiffusionsmessung an unbeschichteten Proben mit rauher bzw. glatter Oberflächenbeschaffenheit, rot dargestellt sind Wiederholungsmessungen

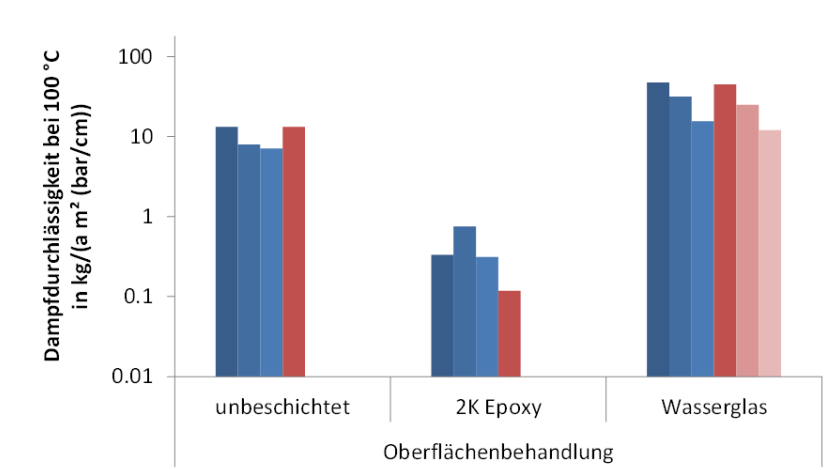


Abbildung 14: Ergebnisse der Dampfdiffusionsmessung an unterschiedlich beschichteten Proben der Charge vom Apr 2014, s = 15 mm, glatte Oberfläche, rot dargestellt sind Wiederholungsmessungen

Der auf Grundlage der Heliumdiffusionsmessungen erwartete Wasserdampftransport durch UHPC ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 in $\text{kg}/(\text{a m}^2 (\text{bar}/\text{cm}))$ dargestellt. Das ist die Masse Wasser, die pro Jahr und m^2

Kanalwandfläche bei einer Wandstärke von 1 cm und einer treibenden Partialdruckdifferenz von 1 bar austritt.

Aus den Ergebnissen wird eine große Streuung über mehrere Größenordnungen deutlich. Die einzelnen Messungen sind dagegen gut reproduzierbar. Als ausreichend diffusionsdicht für angedachte Anwendungen erscheinen die Proben der Charge Mai 2014 sowie die mit Zweikomponenten-Epoxy nachbehandelten Proben der Charge Aug 2014. Eine Beschichtung mit Wasserglas scheint nicht vorteilhaft zu sein. Auch konnte kein Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit gezeigt werden.

Diese Werte bieten jedoch nur eine grobe Abschätzung. Der reale Fall ist sowohl geometrisch als auch vom Transportmechanismus komplexer (gekrümmte Wände, Wechselwirkung Wasser-UHPC, möglicher Transport von flüssigem Wasser mit Phasenwechsel im Beton, Wasserdampf-Luft-Gemisch bei $t < 100\text{ °C}$, ...). Der nächste Schritt, der im Rahmen dieses Vorhabens nicht umgesetzt werden konnte, sind praxisnähere direkte Messungen der Wasserdampfdiffusion. Die vorliegenden Ergebnisse dienen hierzu als wertvolle Grundlage.

2.3 Komponentenentwicklung

Auf Basis der Grundlagenuntersuchungen konnte die Hauptaufgabe des Projekts, die Entwicklung durchströmbarer Komponenten aus UHPC, bearbeitet werden. Bevor die Elemente hergestellt werden konnten, mussten zunächst strukturmechanische und thermische Simulationen für die Auslegung durchgeführt werden.

2.3.1 Strukturmechanische Simulationen

Im ersten Schritt wurde mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine Vorauswahl möglicher Kanalquerschnitte (Abbildung 15) hinsichtlich der auftretenden Spannungen untersucht. Dabei wurden neben den Querschnittsformen auch die Dicken der Platten ober- und unterhalb der Kanäle variiert.

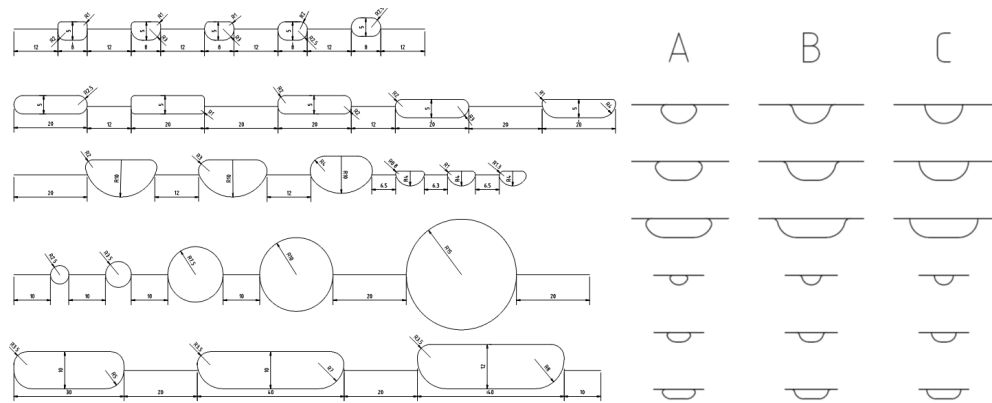


Abbildung 15: Kanalquerschnitte

Als kritische Last für die Kanalstrukturen wurde ein Prüfinnendruck von 9 bar zugrunde gelegt. Dies entspricht dem 1,5-Fachen (normativ vorgegeben) eines angenommenen maximalen Betriebsdrucks von 6 bar. Ein Kanalmittenabstand von 60 mm war vorgesehen, und die obere (ebene) Deckschicht sollte möglichst dünn gestaltet werden. Als Materialeigenschaften wurden ein Elastizitätsmodul von 50000 MPa und eine Querkontraktionszahl von 0,3 gewählt. Aus Symmetriegründen wurden ebene Halbmodelle erstellt und linear-elastisch analysiert. Tabelle 2 zeigt die Zugspannungsverteilung in den Modellen mit kreisförmigen Kanalquerschnitten. Mit zunehmendem Kanaldurchmesser steigen die maximalen Zugspannungen in den Platten, und der Ort des Maximums verlagert sich von der Kanalinnenseite auf die Plattenoberseite. Wird eine Plattenseite verdickt (Unterseite von 5 mm auf 10 mm) sinken zwar lokal die Spannungen in der dicken Seite, das Maximum kann aber in der gegenüberliegenden Seite sogar höher ausfallen als im unverdickten Modell. In Tabelle 3 sind die Zugspannungsverteilungen in den Modellen mit Kanalquerschnitten des Typs C dargestellt. Die scharfen Ecken sind nicht verrundet, sodass die berechneten Maximalspannungen dort aufgrund der Grenzen der Numerik an Singularitäten nicht absolut korrekt sind und entsprechend nur dem Vergleich miteinander dienen. Lehrbuchartig wird dies in Tabelle 4 deutlich, wo der Kanalquerschnitt Typ B links unverrundet scheinbar eine etwas niedrigere Spannung im Kerbgrund aufweist als der rechts mit einem Radius von 0,2 mm verrundete.

Tabelle 2: Zugspannungen in Platten mit kreisförmigen Kanälen unter Innen-
druck. Die Zahlen links von den Spannungsplots kennzeichnen Kanaldurchmes-
ser und Materialüberdeckung ober- und unterhalb der Kanäle. Die höchstbelas-
teten Bereiche sind rot, kaum belastete Bereiche sind blau dargestellt

Kreisförmige Kanalquerschnitte	
Mittige Kanalordnung, Plattendicke ober- und unterhalb: 5 mm	Außermittige Kanalordnung, Plattendicke oberhalb: 5 mm, unter- halb: 10 mm
<p>Max. Zug: 1,1 MPa</p>	<p>Max. Zug: 1,1 MPa</p>
<p>Max. Zug: 1,5 MPa</p>	<p>Max. Zug: 1,4 MPa</p>
<p>Max. Zug: 2,7 MPa</p>	<p>Max. Zug: 2,9 MPa</p>

Tabelle 3: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs C

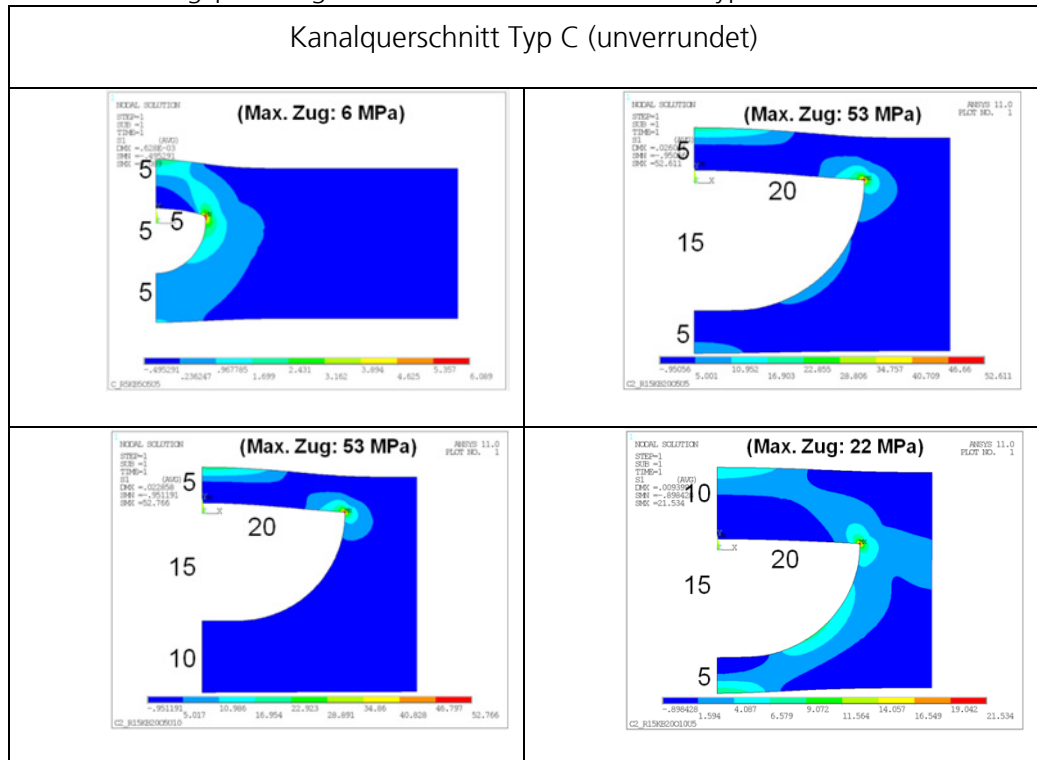
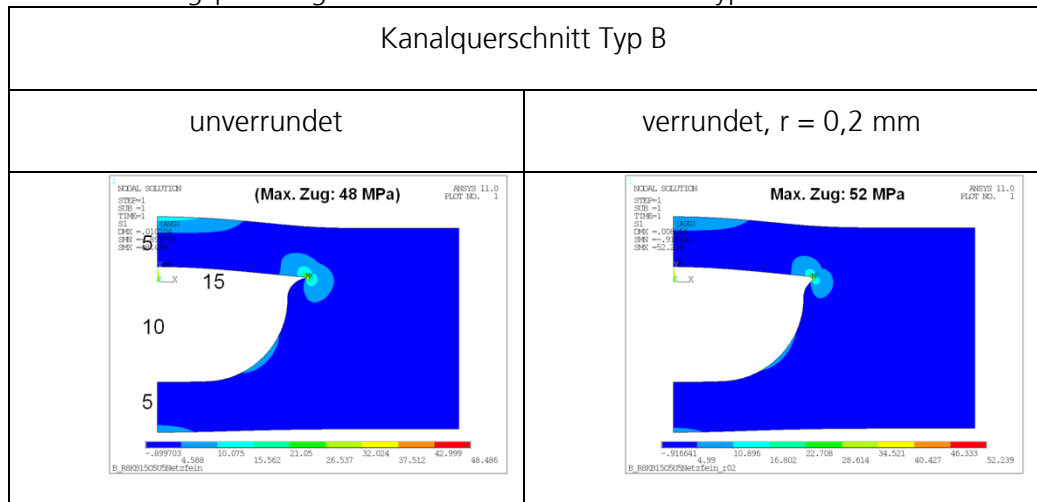


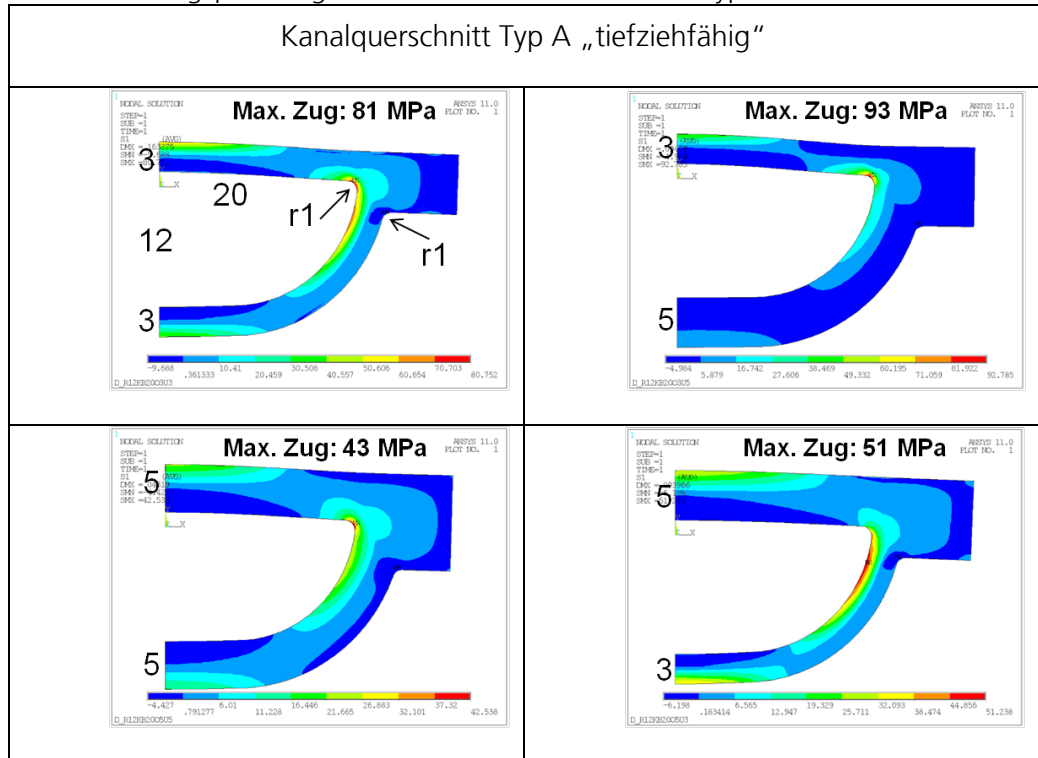
Tabelle 4: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs B



Die „tiefziehfähig“ gestalteten Platten mit Kanalquerschnitten nach Typ A (Tabelle 5) weisen bei Verrundungsradien von 1 mm und Wandstärken von 3 bzw. 5 mm maximale Spannungen zwischen 43 und 93 MPa auf, was die Zugfestigkeit des Betons (ca. 10-14 MPa gemäß Messungen von G.tecz) deutlich übersteigt. Maßnahmen zur Spannungssenkung wären dickere Wandstärken,

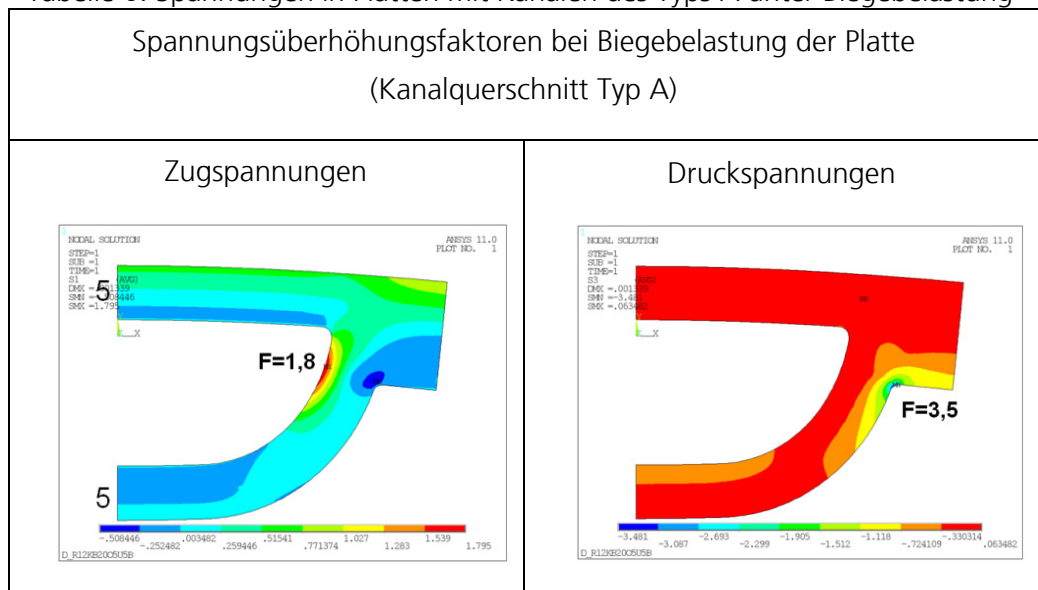
größere Verrundungen und Kanalquerschnitte mit einem Höhe-zu-Breite-Verhältnis nahe an 1 und annähernd kreisrund.

Tabelle 5: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs A



Analysen der Platten unter Biegebelastung (Tabelle 6) zeigen, bezogen auf die angelegte Biegespannung, Spannungsüberhöhungen zwischen 1,8 an der Kanalinnenseite und 3,5 an der Kreiskerbe auf der Plattenunterseite.

Tabelle 6: Spannungen in Platten mit Kanälen des Typs A unter Biegebelastung



Ein nach Fertigungsgesichtspunkten gestalteter Kanalquerschnitt (breitester Querschnitt der gewählten FracTherm®-Struktur) wurde analysiert (Abbildung 16) und weist bei 9 bar Innendruck maximale Spannungen von ca. 30 MPa auf.

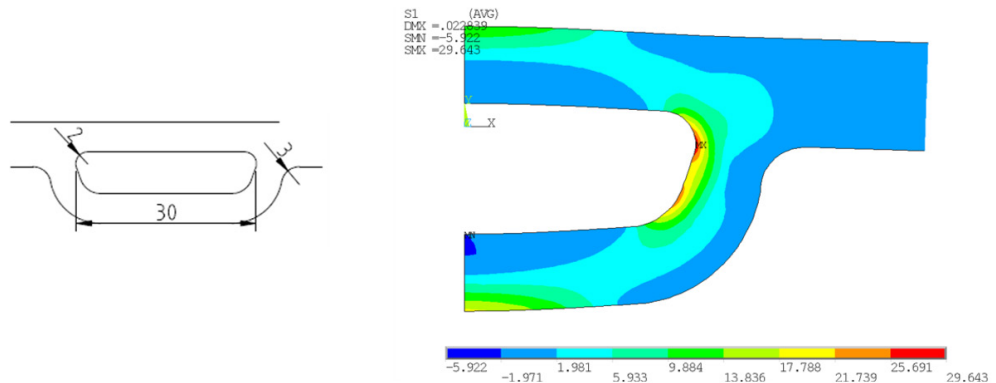


Abbildung 16: Skizze eines fertigungsgerechten Kanalquerschnitts (links) und FEM-Analyse der Zugspannungen unter Innendruck (rechts)

In Folge wurde ein unter Beachtung von Fertigungsgesichtspunkten und vorherigen Analysen entworfenes weiteres Set von Kanalquerschnittsgeometrien (Abbildung 17) untersucht. Kritisch sind insbesondere die FracTherm®-Kanäle am Ein- und Austritt eines Bauteils, weil sie aufgrund der größten Breite die höchsten Spannungen aufweisen.

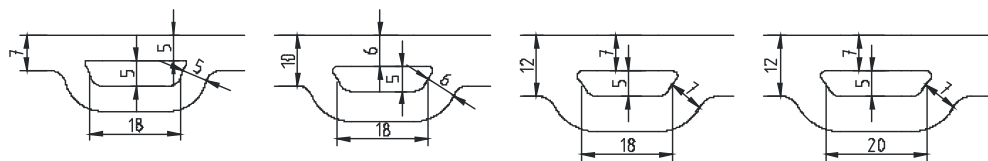


Abbildung 17: Querschnitte der breitesten FracTherm®-Kanäle Typ E

Die maximalen Zugspannungen treten im Kanallinneren an der kleinen Verrundung auf und betragen bei der Kanalquerschnittsform aus Abbildung 17 mit einer Wandstärke von 5 mm und Kanalbreiten von 10, 15 und 18 mm zwischen 11,2 und 24,6 MPa. Bei 7 mm Wandstärke und den o. g. Kanalbreiten sinken die maximalen Zugspannungen um etwas weniger als 50 % und betragen zwischen 6,1 und 12,7 MPa. Bei 15 mm Kanalbreite beträgt die maximale Zugspannung 10 MPa.

Ergänzend wurde eine weitere Kanalform (Typ F) analysiert, die auch tiefziehfähig herstellbar sein dürfte und die maximalen Zugspannungen selbst bei einer Wandstärke von nur 5 mm nochmals deutlich senkt.

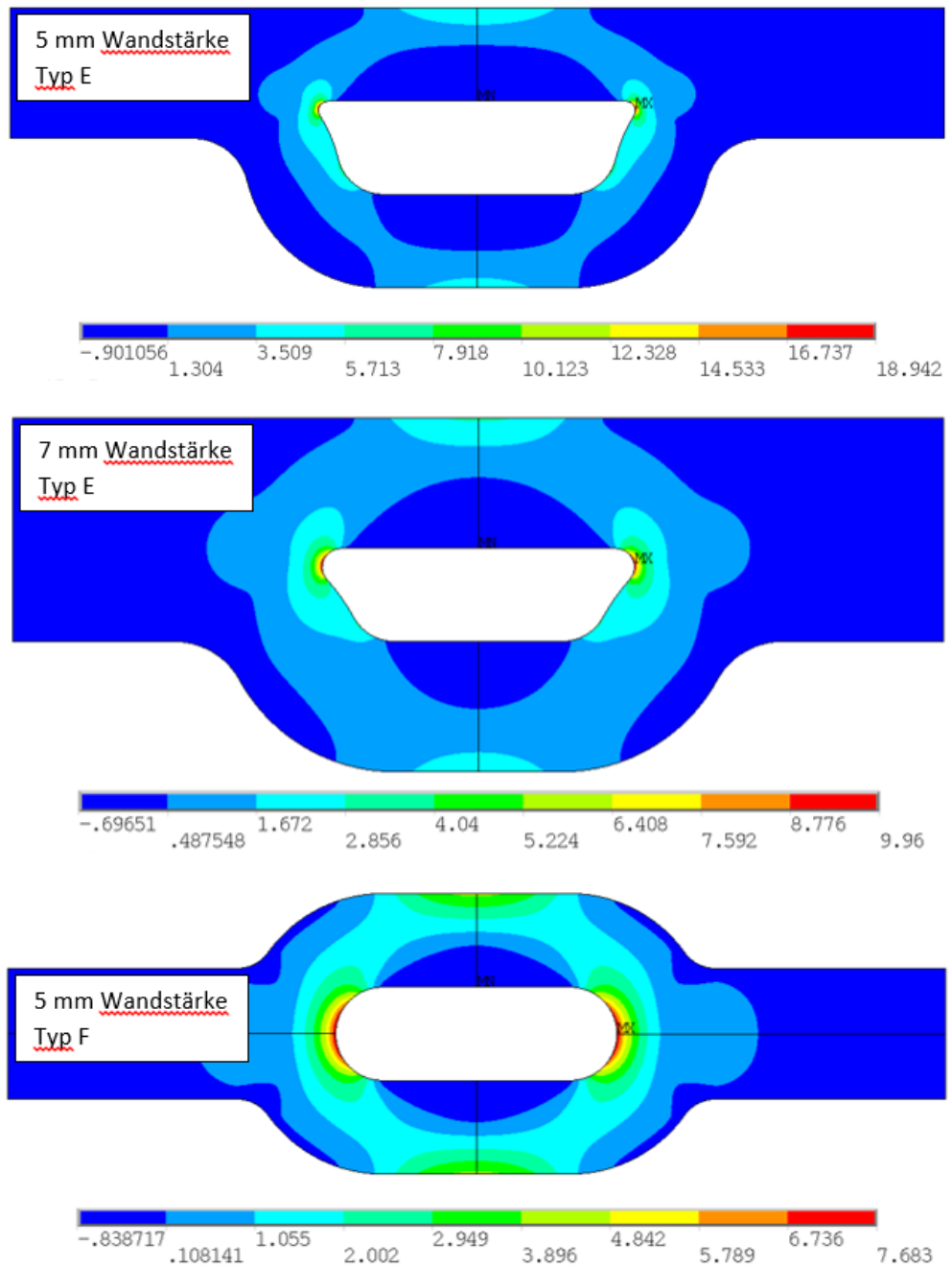


Abbildung 18: Zugspannungsverteilung in verschiedenen Kanalquerschnitten (oben und Mitte Typ E aus Abbildung 17, unten Typ F) und -wandstärken, Kanalbreite: 15 mm

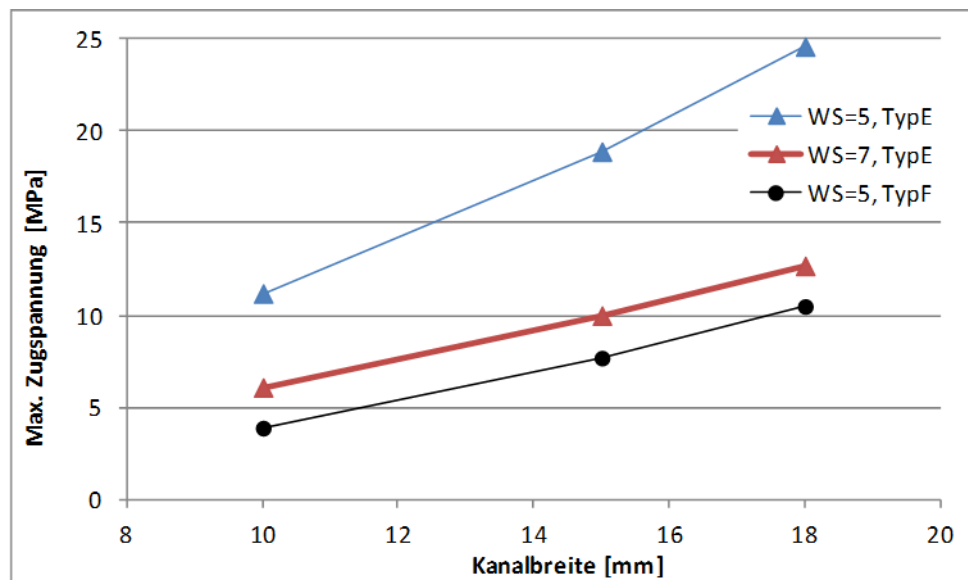


Abbildung 19: Maximale Zugspannungen bei verschiedenen Kanalquerschnitten und -wandstärken (WS) in Abhängigkeit der Kanalbreite

Einfluss der Wärmedämmschicht (WDS)

Um die thermische Effizienz zu erhöhen, benötigt ein Solarkollektor eine Wärmedämmschicht, die sich je nach Material auch auf die mechanischen Eigenschaften des TABSOLAR-Elements auswirken kann. Der strukturelle Beitrag der WDS wurde untersucht und wird im Folgenden dargestellt. Aus fertigungstechnischen Gründen wurde im Modell die tiefgezogene Platte des TABSOLAR-Elements auf 4 mm Dicke reduziert, die obere Deckschicht bleibt 7 mm dick. Die Dicke der WDS wurde von 0 mm auf 60 mm in 20-mm-Schritten erhöht. Der Elastizitätsmodul der WDS betrug dabei 1000 MPa, was im Bereich kommerzieller mineralischer WDS liegt. Die aufgetragene WDS senkt dabei die Zugspannungen im Beton um ca. 10 %, Schichtdicken größer 20 mm bringen aber keine weiteren mechanischen Vorteile.

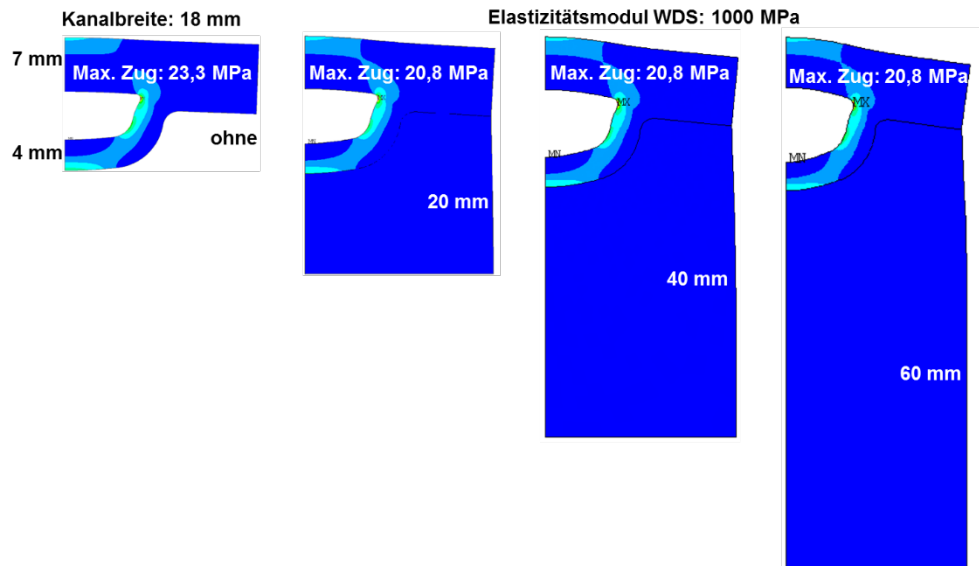


Abbildung 20: Maximale Zugspannungen in Abhängigkeit der Dicke der WDS

Einfluss des Elastizitätsmoduls der WDS

Wird der Elastizitätsmodul der WDS auf 5000 MPa erhöht (bei 20 mm Dicke), sinkt die maximale Zugspannung um weitere ca. 10 %. Da Maßnahmen zur Steigerung der Steifigkeit (z. B. höhere Dichte oder Faserzugabe) die Dämmeigenschaften verschlechtern und lediglich eine dünne Schicht unmittelbar am Wärmetauscher mechanisch effektiv ist, genügt es, auch nur in diesem Bereich die Steifigkeit zu erhöhen.

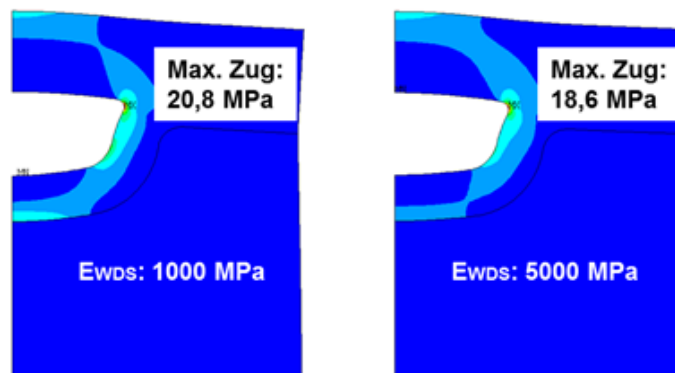


Abbildung 21: Maximale Zugspannungen in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls der WDS (Dicke: 20 mm)

Der Einfluss von Stahlfasern im Beton

Aus den Mischungsregeln lässt sich das Potenzial von Faserzugaben abschätzen. Im günstigsten Fall liegen die Fasern parallel zur Last. Dann ergibt sich der Elastizitätsmodul (nach [7]) zu:

$$E_{||} = E_m \left[1 + f_f \left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right) \right]$$

Durch Zugabe von 2 Volumenprozent Stahlfasern ($E = 210000$ MPa) kann der Verbund-Elastizitätsmodul im günstigsten Fall lediglich um ca. 6 % gesteigert werden, und die Spannung in der Matrix (Beton) sinkt entsprechend. Die Rissentstehung im Beton wird zwar nur geringfügig verzögert, jedoch der Rissfortschritt und ggf. Durchriss im faserverstärkten Material werden behindert. Falls in der Verbindungsfläche der Platten keine Faserdurchdringungen realisiert werden können, wird dieser Bereich kritisch und ist nach Möglichkeit konstruktiv zu entlasten.

Selbstoptimierung der Kanalquerschnitte beim Fertigungsprozess durch Innendruck

Bauteile können durch mechanische Deformation eine für die ursächliche Belastung vorteilhafte Form annehmen. Dieser Effekt kann gut zur Selbstoptimierung genutzt werden [8]. Auf die Kanalstrukturen übertragen bedeutet das, dass dem Fertigungsprozess durch Tiefziehen, Verbinden der Boden- und Deck-schicht und Entformung eine Beaufschlagung der Kanäle durch (leichten) Innendruck folgen müsste, noch vor der Aushärtung des Betons. In der Simulation führt diese Formoptimierung zu einer Spannungsreduktion von ca. 14 % ohne zusätzlichen Materialaufwand. Allerdings ist eine Entformung vor der vollständigen Aushärtung des Betons wohl kaum zu realisieren, so dass dieses Konzept mit dem vorgesehenen Fertigungsprozess eher nicht umsetzbar erscheint.

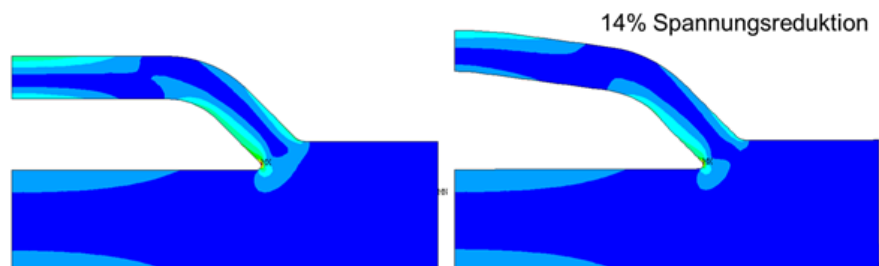


Abbildung 22: Die Optimierung durch Deformation im Fertigungsprozess senkt die max. Spannungen um ca. 14 %

2.3.1.1 Kanalquerschnitte (ohne und mit Epoxidharzauskleidung)

Eine Möglichkeit, die Belastbarkeit der Kanäle gegen Innendruck zu steigern, besteht in der Auskleidung mit z. B. Epoxidharz. In dem nach dem Foto in Abbildung 23 modellierten Kanal sinkt dadurch die maximale Zugspannung um ca. 40 %. Erhöht man die Steifigkeit des Auskleidungswerkstoffes von 2800 MPa durch z. B. Harz mit Füllstoff oder Kurzfasern auf ca. 10000 MPa, sind Spannungsreduktionen über 65 % möglich (Abbildung 24). Bei breiten Kanälen wie in Abbildung 25 gezeigt können mit der Harz-Auskleidung die Spannungen um über 30 % gesenkt werden.

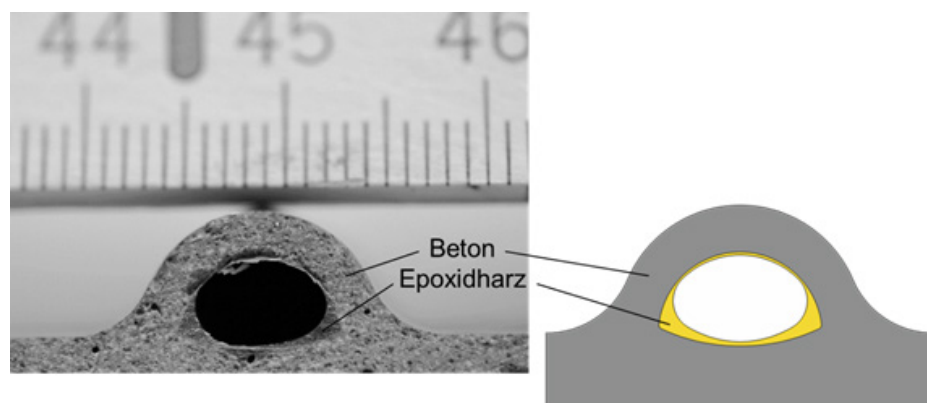


Abbildung 23: Schnitt durch das mit Epoxidharz ausgekleidete TABSOLAR-Element

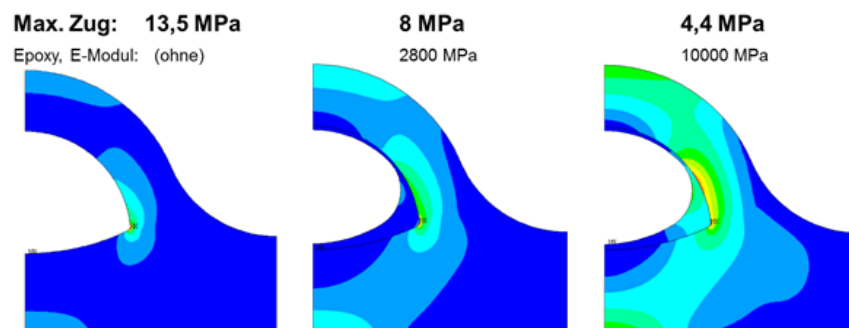


Abbildung 24: Maximale Zugspannungen in Kanälen ohne und mit Auskleidung

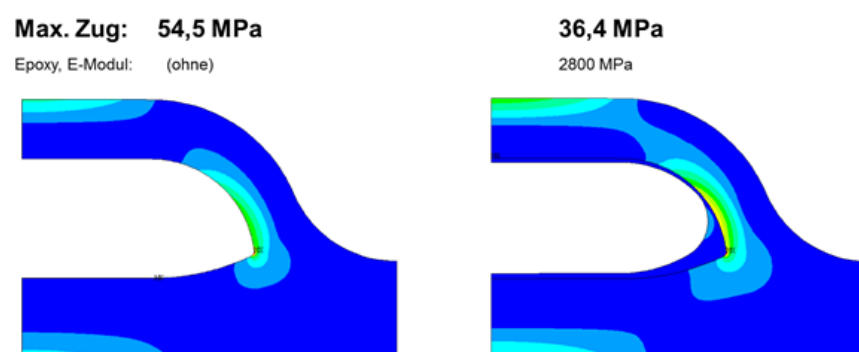


Abbildung 25: Maximale Zugspannungen in breiten Kanälen ohne und mit Auskleidung

2.3.1.2 Optimierung von abgehängten Decken

Als optimales Gestaltungsprinzip bezüglich der Versagensgefahr infolge Materialermüdung kann bei mechanisch belasteten Strukturen eine kerbspannungsfreie Oberfläche mit homogener Spannungsverteilung angesehen werden. Dies gilt sowohl für biologische als auch für technische Strukturen. Erstere, wie z. B. Bäume und Knochen, verfügen über "bauteilinterne" Rezeptoren und können damit lokale Spannungskonzentrationen registrieren, adaptiv wachsend diese mindern sowie sich reparieren. Im Gegensatz zu biologischen Strukturen ist die Fähigkeit selbst modernster technischer Strukturen zur Selbstheilung und -optimierung im Betrieb so gut wie nicht vorhanden. Jedoch können die natürlichen Wachstums- und Gestaltungsprinzipien auf das Design technischer Bauteile übertragen und diese zumindest für die zu erwartenden Belastungen optimiert werden. Löcher und notwendige Aussparungen in belasteten Bereichen natürlicher Strukturen sind häufig sowohl hinsichtlich des Materials (lokal angepasste E-Modulverteilung, gerichtete Anisotropie) als auch der Form optimiert. Dem Baum zugefügte Löcher (Abbildung 26a) verheilen spindelförmig in Richtung des Kraftflusses. Dies trifft ebenso auf die Form der Holzstrahlen zu (Abbildung 26b), die wie die Aussparungen für Gewebe und Stacheln im Skelett des Teddybearkaktus (Abbildung 26c) von den Fasern spindelförmig eingefasst werden, was eine weiche Kraftflussumlenkung und niedrige Spannungskonzentrationen bewirkt. Wo die Kreisform erhalten bleiben muss, wie z. B. bei der Blutversorgung des Knochens, werden die Gefäße schräg zur Knochenlängsachse durch die Wandung geführt [9], so dass der Lochquerschnitt parallel zur Knochenwand elliptisch ist.

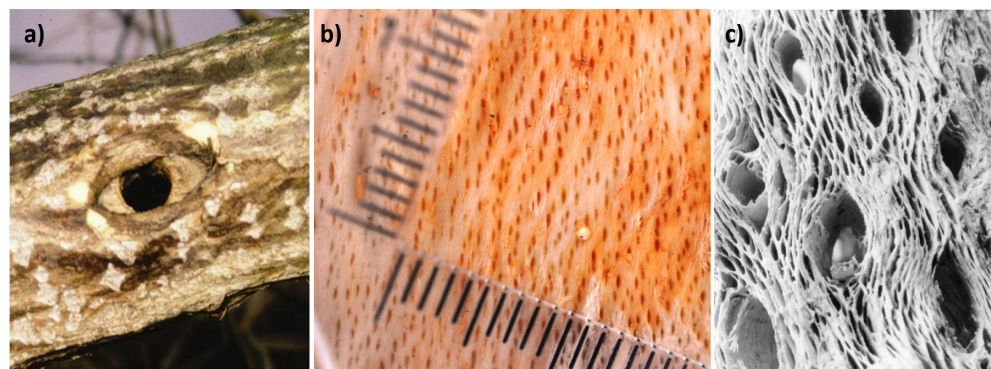


Abbildung 26: Aus einem in einen Baum (hier Pappelast) gebohrten Kreisloch (a) entsteht durch neu gebildete Holzfasern eine Spindel. Auch die Querschnitte der Holzstrahlen (b) und Aussparungen im Skelett des Teddybearkaktus (c) weisen in Kraftflussrichtung orientierte Spindeln auf

Ein mögliches Einsatzgebiet des TABSOLAR-Elements besteht in der Deckenheizung oder -kühlung. Solche Heiz- bzw. Kühlkörper sind von einem Medium durchflossene, von der Decke abgehängte flächige Bauteile. Abbildung 27 zeigt die stark vergrößerten Verformungen einer durch Eigengewicht belasteten, an 6 Stellen gelagerten zweischichtigen Platte. Aus akustischen Gründen werden auch für thermisch aktive Deckenelemente strukturierte Oberflächen benötigt. Eine aufgrund ihrer Effektivität und aus optischen Gründen häufig angewandte Oberflächenstrukturierung besteht in der Einbringung von Löchern. Wie alle „Störungen“ in lasttragenden Strukturen birgt dies mechanische Nachteile. Neben der Schwächung durch das entnommene Material treten nun Kraftflussumlenkungen und Spannungskonzentrationen an den Konkavitäten auf. In Abbildung 28 ist die Verteilung der Zugspannungen auf der Unterseite der nun gelochten Schicht der Platte dargestellt. Die höchsten Zugspannungen treten zwischen den Löchern im mittleren Bereich der Platte auf.

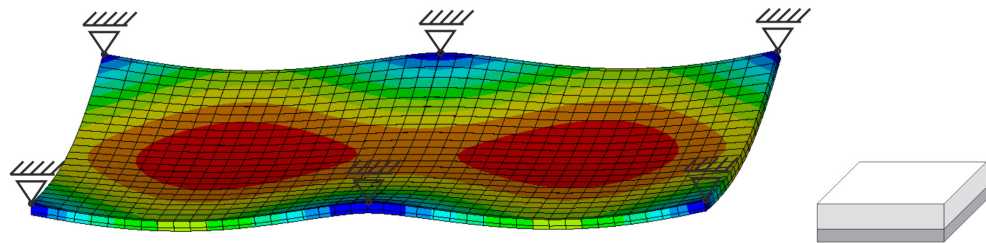


Abbildung 27: Verformungen (stark vergrößert) einer durch Eigengewicht belasteten, an 6 Stellen gelagerten zweischichtigen Platte

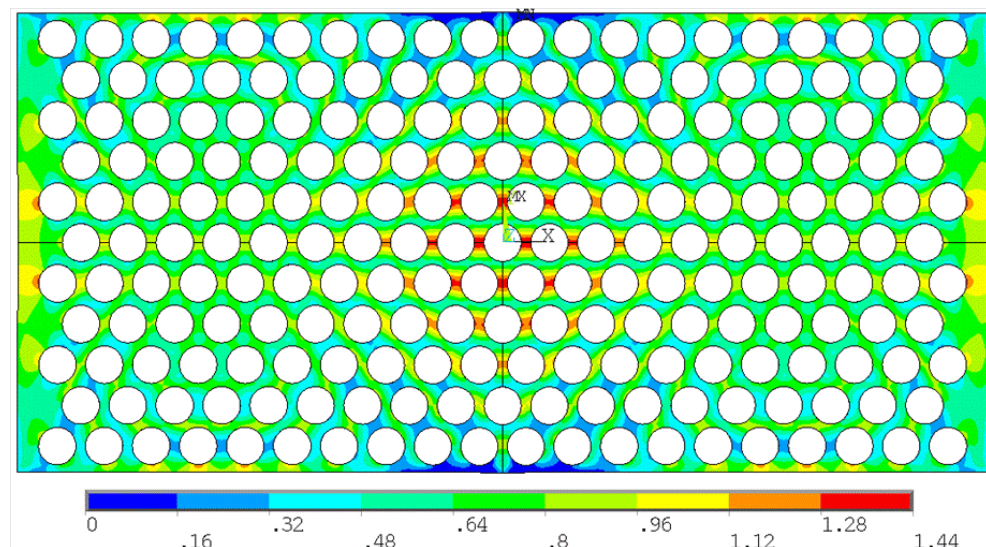


Abbildung 28: Verteilung der Zugspannungen auf der Unterseite der gelochten Plattenschicht

Da Betone um ein vielfaches geringere Zug- als Druckfestigkeiten aufweisen, ist es besonders effektiv, die Zugspannungen im Bauteil zu minimieren. Jedes einzelne Loch mit konventionellen oder in der VDI-Richtlinie 6224 beschriebenen Methoden zu optimieren wäre technisch möglich, aber extrem zeit- und rechenintensiv und würde auch den Fertigungsaufwand weiter erhöhen. Ein neues, von den biologischen Strukturen aus Abbildung 26 inspiriertes Optimierungsverfahren ermöglicht, dies nun einfach und effektiv durchzuführen, indem – wo es sinnvoll ist – von der Kreislochform abgewichen wird und stattdessen in Richtung der lokal größten Hauptnormalspannung orientierte Ellipsen mit angepassten Halbachsendurchmessern Verwendung finden. In einem ersten Schritt wird ein einfaches Grundmodell der zu optimierenden Struktur erstellt. Verschiedene Schichten bilden den Aufbau der Struktur ab. An den Positionen in der unteren Schicht, an denen sich später die Löcher befinden, liegen Knoten des FEM-Netzes. Damit wird in einer FEM-Analyse, dem zweiten Schritt, der lokale Spannungszustand an diesen Positionen bestimmt. Zuletzt wird anhand Größe und Richtung der lokalen Hauptspannungen die Größe und Orientierung der Ellipsenhalbachsen festgelegt. Die maximale Zugspannung (1. Hauptnormalspannung) bestimmt die Richtung der großen Ellipsenhalbachse und, innerhalb festgelegter Grenzen, die Größe der kleinen. Um die akustischen Eigenschaften zu erhalten, dürfen die Ellipsen nicht zu klein werden, deshalb sollen die Halbachsenlängen a , b nicht kleiner als der halbe Kreisdurchmesser werden. Als unterer Grenzwert für die Spannung wurde $\sigma_u = 2/3 \sigma_{\max}$ gewählt, d. h. nur in hoch belasteten Bereichen, wo die Spannung größer als zwei Drittel der maximalen Zugspannung in der Lochschicht ist, werden die Löcher modifiziert. In Abbildung 29 sind die Hauptnormalspannungen auf der Plattenunterseite des Grundmodells als Vektorplot dargestellt, und Abbildung 30 zeigt die Zugspannungsverteilung in der optimierten Lochschicht. Aus Symmetriegründen wurde ein Viertelmodell (1. Quadrant) analysiert und dargestellt.

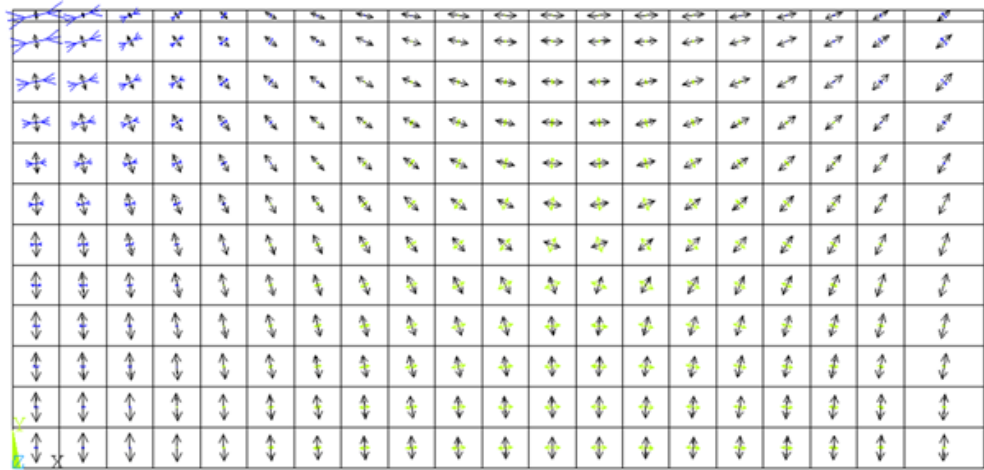


Abbildung 29: Vektorplot der Hauptnormalspannungen auf der Plattenunterseite (Viertelmodell)

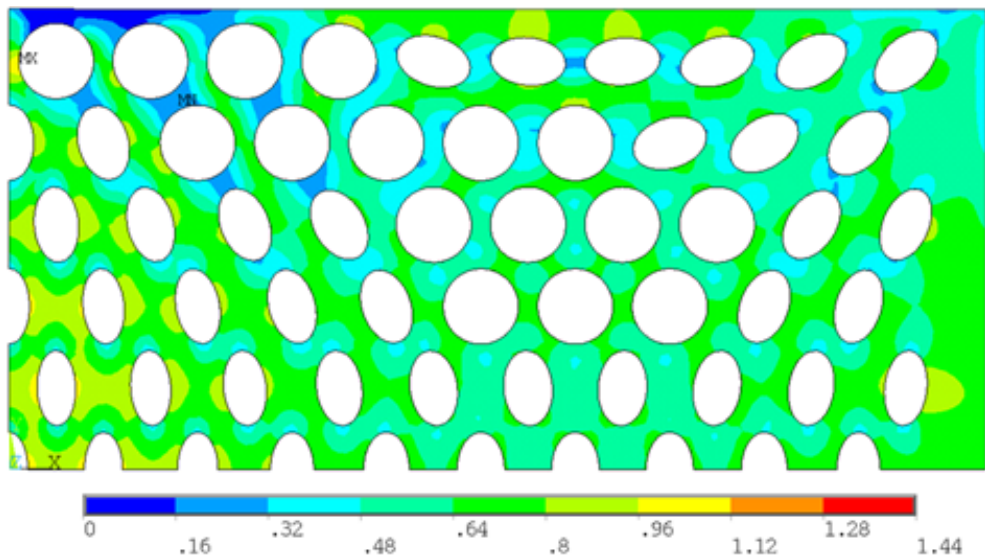


Abbildung 30: Verteilung der Zugspannungen in der optimierten Lochschicht (Viertelmodell)

Die Optimierung senkt die Spannungen um ca. 30 % und benötigt in der Lochschicht dafür ca. 30 % zusätzliches Material. In etwa die gleiche Spannungsreduktion kann bei unveränderter Lochgeometrie durch eine Vergrößerung der Schichtdicke erreicht werden, wofür die zweieinhalbfache Menge Material erforderlich ist. Wird die Schichtdicke beim Ursprungswert belassen, kann eine 30%-Reduktion der maximalen Zugspannungen auch durch Verkleinerung der Lochdurchmesser um ca. 40 % erreicht werden, was die Masse um 70 % erhöht.

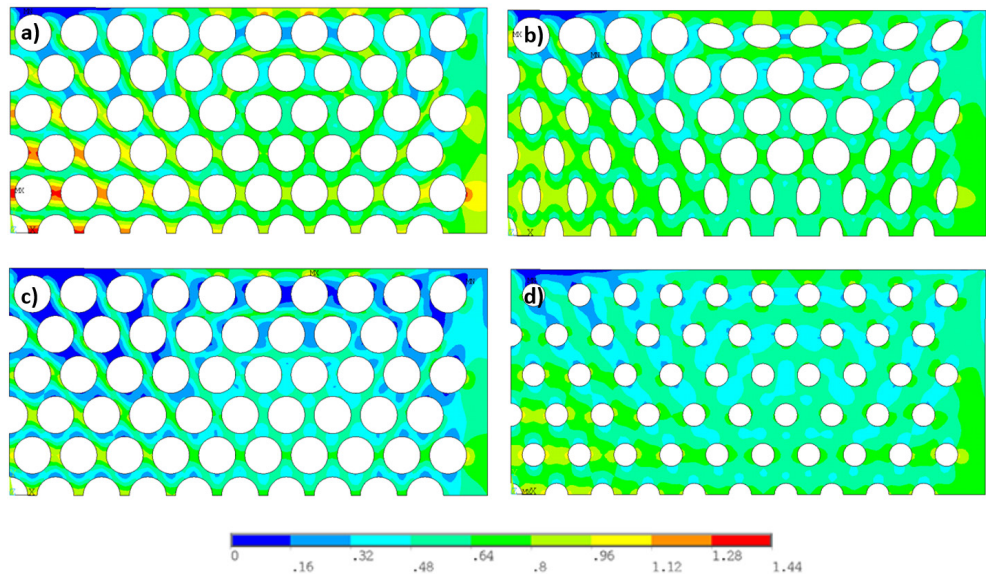


Abbildung 31: Verteilung der Zugspannungen in den verschiedenen Modellen. Im Vergleich zum Ausgangsmodell a) (Schichtdicke $h = 10$ mm, Kreisdurchmesser $D = 80$ mm, Materialbedarf $m = 100$ %) sind die maximalen Zugspannungen in den Modellen b), c) und d) um ca. 30 % reduziert. b) Optimiertes Ellipsenmodell, $h = 10$ mm, $m = 130$ %. c) Aufgedicktes Modell, $h = 25$ mm, $D = 80$ mm, $m = 250$ %. d) Modell mit kleineren Löchern, $h = 10$ mm, $D = 50$ mm, $m = 170$ %

2.3.2 Thermische Simulationen

2.3.2.1 Kollektorwirkungsgradfaktor F'

Im Hinblick auf den Einsatz der durchströmbaren Bauteile als Solarabsorber ist neben den optischen Eigenschaften die thermische Effizienz von großer Bedeutung. Sie wird durch die Materialeigenschaften, die Geometrie und die Fluidströmung bestimmt. Als Maß für die thermische Effizienz wird in der Solarthermie üblicherweise der Kollektorwirkungsgradfaktor F' verwendet; er quantifiziert bei gegebener Wärmedämmung, wie gut die Wärme von der Absorberoberfläche ins Fluid übertragen wird. In einem ersten Schritt wurde F' für eine angenommene Absorbergeometrie aus numerischen Simulationen ermittelt (Abbildung 32).

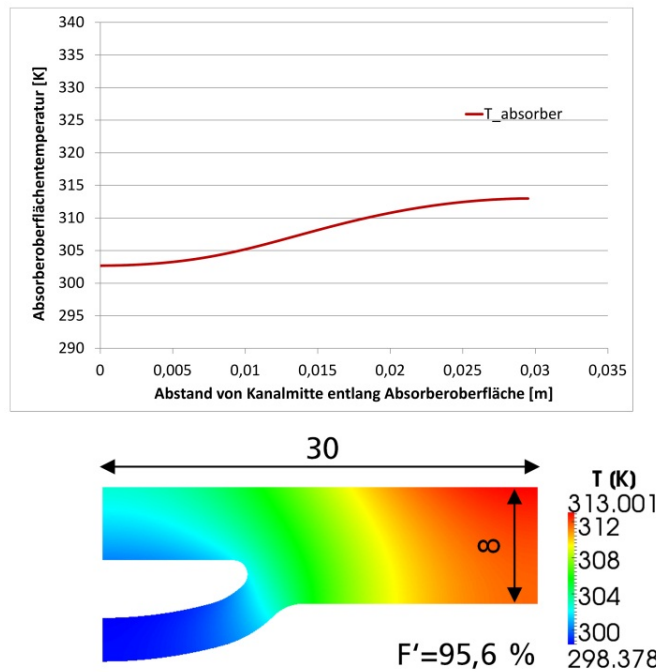


Abbildung 32: Temperaturverteilung eines UHPC-Absorbers entlang der Oberfläche (oben) und im Querschnitt sowie ermittelter Kollektorwirkungsgradfaktor F' (unten). Randbedingungen: $U_L = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $h_{fi} = 500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $G(\tau\alpha)_e = 800 \text{ W}/\text{m}^2$, $T_{\text{fluid}} = 298 \text{ K}$, $T_{\text{amb}} = 293 \text{ K}$

Unter den getroffenen Annahmen konnte trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit von UHPC (Annahme hier: $2 \text{ W}/(\text{mK})$) ein Kollektorwirkungsgradfaktor F' von 95,6 % errechnet werden. Dies ist ein Wert, der ähnlich hoch oder sogar höher liegt als jener von Metallabsorbern nach dem Stand der Technik.

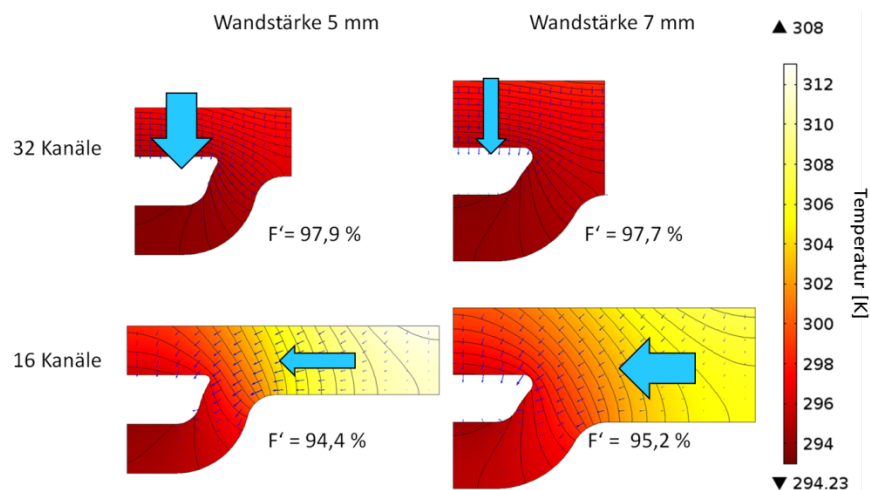


Abbildung 33: Temperaturverteilung von TABSOLAR-Kanälen mit unterschiedlichen Kanalabständen und Wandstärken

Nachdem die Wandstärken und Kanalbreiten der Querschnittsgeometrien aufgrund der FEM-Simulationen des KIT angepasst wurden, wurden am Fraunhof-

er ISE wiederum thermische Simulationen zur Berechnung des Kollektorwirkungsgradfaktors F' durchgeführt. Abbildung 33 zeigt den Vergleich zwischen den Varianten mit 5 mm und 7 mm Wandstärke für 16 bzw. 32 Kanäle pro Meter Breite. Interessant ist dabei, dass F' bei 32 Kanälen leicht sinkt, während er bei 16 Kanälen steigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem geringeren Kanalabstand der Variante mit 32 Kanälen der Effekt des höheren vertikalen thermischen Widerstands zwischen der Oberfläche und dem Fluid dominiert, während dieser bei der Variante mit 16 Kanälen durch den geringeren horizontalen thermischen Widerstand im Bereich zwischen den Kanälen überkompensiert wird (die Pfeile in Abbildung 33 symbolisieren qualitativ die jeweiligen Wärmeströme). In allen Fällen kann jedoch festgestellt werden, dass F' nach diesen – rein stationären – Betrachtungen nach wie vor im Bereich des Stands der Technik üblicher metallischer Solarabsorber bzw. darüber liegt.

2.3.2.2 Knotenmodelle mit Kapazitäten

Um das dynamische Verhalten von TABSOLAR-Elementen korrekt in Simulationsrechnungen abbilden zu können, werden geeignete physikalische Modelle unter Berücksichtigung der Wärmekapazität benötigt. Aufgrund der gegenüber einem konventionellen Solarabsorber aus dünnem Metallblech deutlich höheren Masse eines TABSOLAR-Absorbers kommt seiner Wärmekapazität und der damit verbundenen thermischen Trägheit eine besondere Bedeutung zu. Das thermische Verhalten einzelner Kanäle wurde mit der Software COMSOL Multiphysics zweidimensional numerisch simuliert (Abbildung 34, links), jedoch wäre eine komplette Jahressimulation mit der Software zu rechen- und damit zeitintensiv. Daher sollte ein vereinfachtes Knotenmodell (RC-Netzwerk) in der dynamischen Simulationsumgebung Dymola/Modelica erstellt werden. Zur Bestimmung der Parameter (thermische Widerstände und Wärmekapazitäten) wurde die in COMSOL modellierte Geometrie in fünf Bereiche aufgeteilt. Die Bereichsgrenzen orientierten sich dabei an den ermittelten Isothermenverläufen, so dass relativ homogene Temperaturverteilungen erreicht wurden (Abbildung 34, Mitte). Aus einer Bilanzierung der jeweiligen Bereiche konnten die Wärmeströme und gemittelten Temperaturen und hieraus wiederum die thermischen Widerstände zwischen den einzelnen Bereichen ermittelt werden. Ebenso wurden die Wärmekapazitäten pro Bereich berechnet. Hieraus konnte schließlich ein vereinfachtes Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk (RC-Netzwerk) als Knotenmodell für Dymola/Modelica erstellt werden (Abbildung 34, rechts).

Abbildung 35 zeigt die entsprechende Umsetzung in Dymola/Modelica (links) sowie das zugehörige Kollektor-Testmodell (rechts).

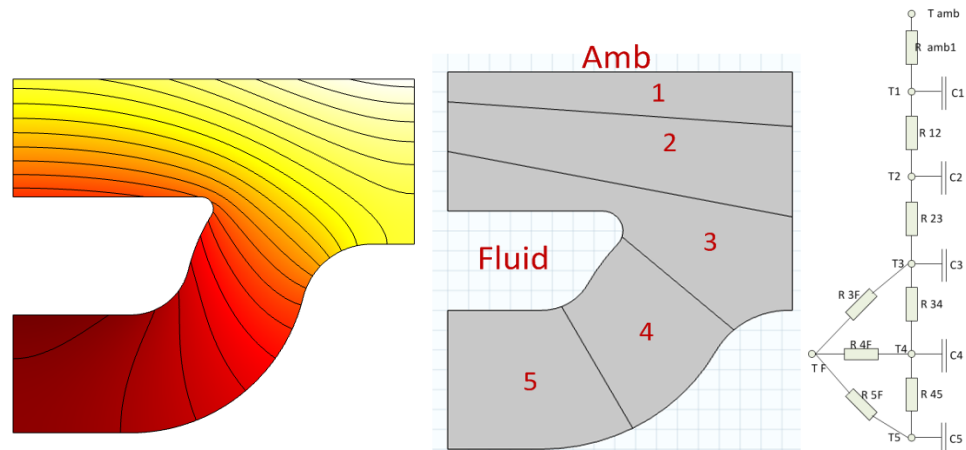


Abbildung 34: Erstellung eines Knotenmodells aus realer Geometrie: Temperaturverlauf aus numerischer Simulation (links), Aufteilung in fünf Bereiche entsprechend Isothermenverlauf (Mitte), RC-Netzwerk als Knotenmodell (rechts)

Das numerische Modell in COMSOL und das Knotenmodell in Dymola/Modelica wurden hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens verglichen, in dem ein fiktiver Solarstrahlungsverlauf simuliert wurde. Dabei wurde eine Abnahme von 800 W/m² auf 0 W/m² innerhalb von fünf Minuten und eine entsprechende Zunahme nach fünf Minuten angenommen (Abbildung 36).

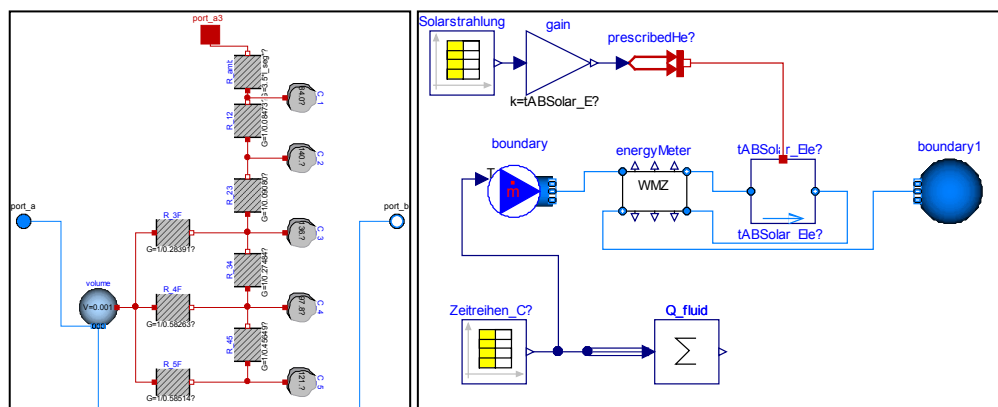


Abbildung 35: TABSOLAR-Element (links) und Kollektor-Testmodell (rechts) in Dymola/Modelica

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die „Sprungantwort“ der Temperaturen auf diesen Solarstrahlungsverlauf für eine angenommene Fluidtemperatur von 20 °C bzw. 60 °C. In Abbildung 39 ist außerdem der Verlauf des Wärmestroms zum Fluid für eine angenommene Fluidtemperatur von 20 °C zu sehen. Es wird deutlich, dass die Kurvenverläufe relativ gut übereinstimmen und

somit das RC-Netzwerk das dynamische Verhalten des TABSOLAR-Elements gut abbildet.

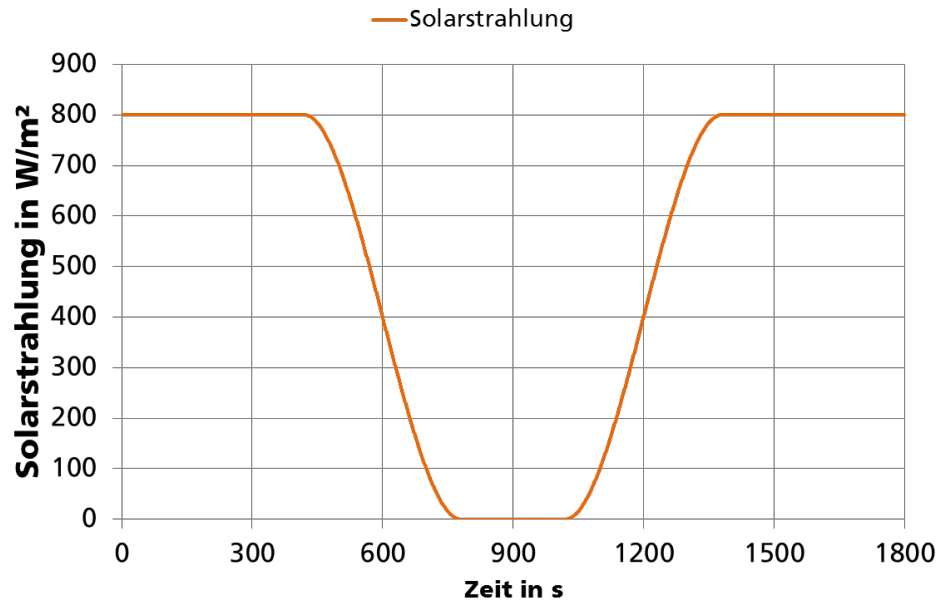


Abbildung 36: Angenommener Solarstrahlungsverlauf zur Untersuchung der "Sprungantwort" des TABSOLAR-Elements

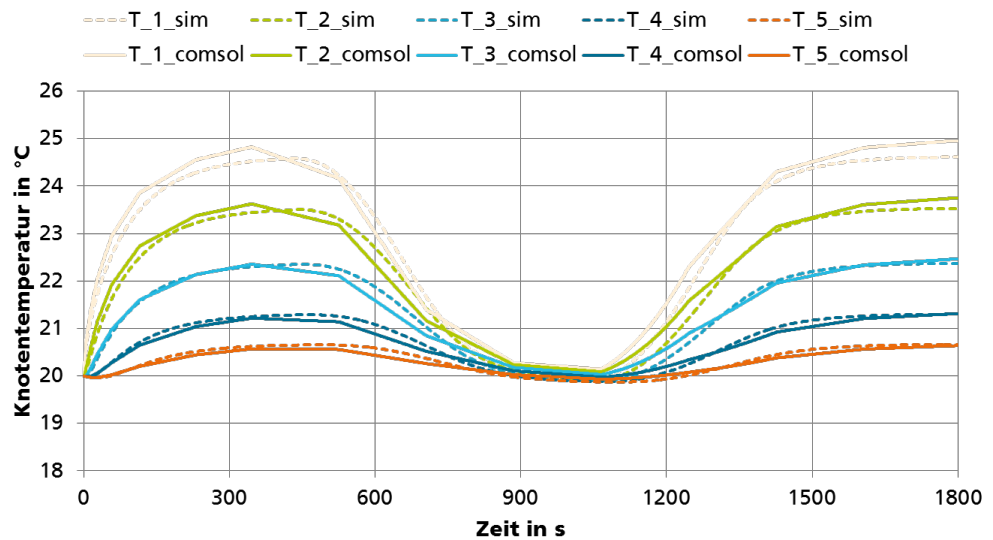


Abbildung 37: Temperaturverläufe der einzelnen Bereiche (COMSOL, Index "comsol") bzw. Knoten (Dymola/Modelica, Index "sim") nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36; $T_{\text{fluid}} = 20 \text{ °C}$, $T_{\text{ambient}} = 20 \text{ °C}$

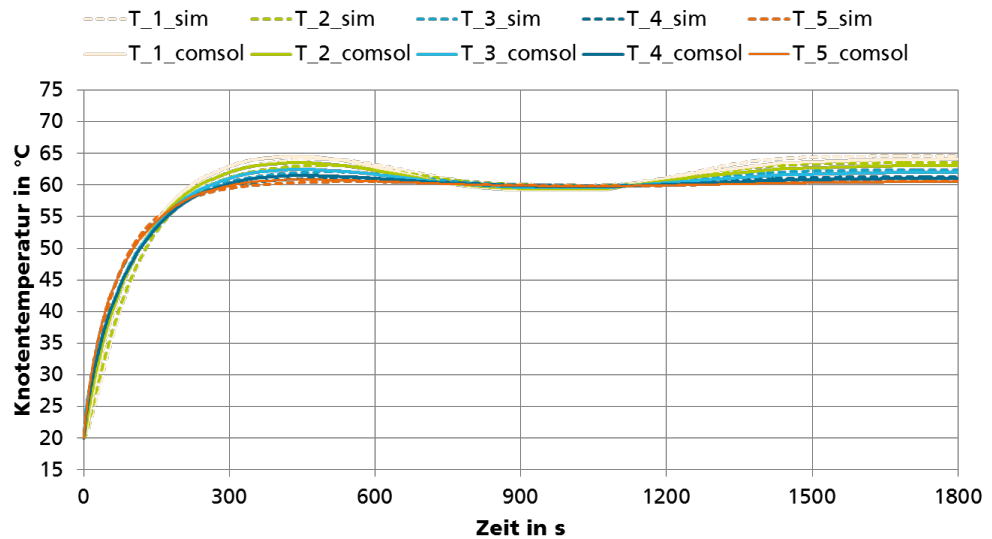


Abbildung 38: Temperaturverläufe der einzelnen Bereiche (COMSOL, Index "comsol") bzw. Knoten (Dymola/Modelica, Index "sim") nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36; $T_{\text{fluid}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{ambient}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

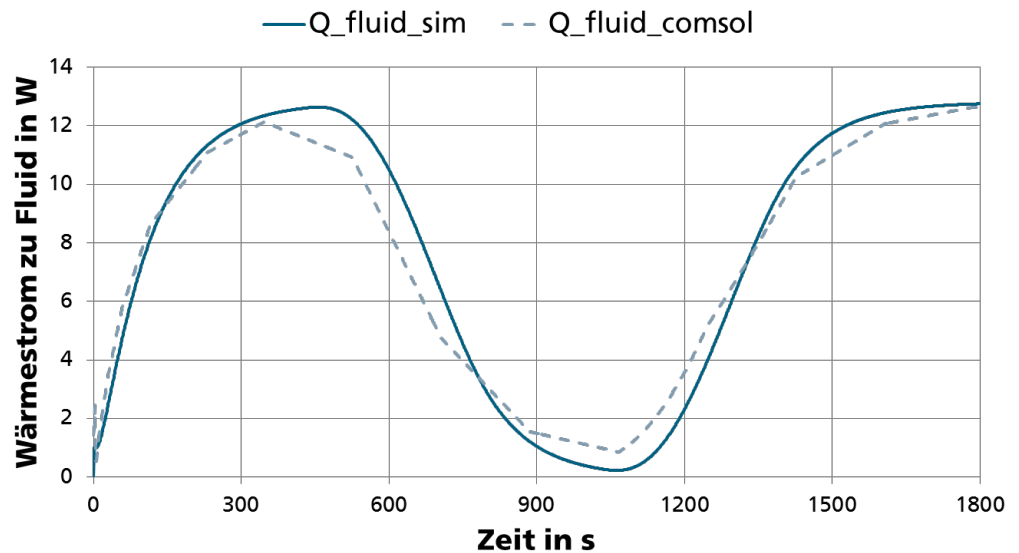


Abbildung 39: Verlauf des Wärmestroms zum Fluid nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36 (COMSOL, Index "comsol", bzw. Dymola/Modelica, Index "sim"); $T_{\text{fluid}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{ambient}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Das so erstellte Knotenmodell wurde anschließend derart erweitert, dass über das physikalische Modell in Modelica die Parameter η_0 , a_1 und a_2 (stationär) bestimmt werden können. Diese beschreiben eine Wirkungsgradkennlinie (WKL) und dienen damit als Basis für Jahressimulationen mit dem Simulationsprogramm TRNSYS. Darüber hinaus wurde die effektive Wärmekapazität des Kollektors C_{eff} durch dynamische Simulationen bestimmt. Für Jahressimulationen ist es ausreichend, das dynamische Verhalten des gesamten Kollektors durch eine

einzigste effektive Wärmekapazität abzubilden. Dabei wurden die Normtestbedingungen nach EN 12975 Anhang G nachgebildet und C_{eff} durch eine Sprungantwort auf die Änderung der Eintrittstemperatur ermittelt (Abbildung 40). Somit wurde also von der detaillierten numerischen Modellierung in COMSOL über das vereinfachte RC-Netzwerk mit fünf Knoten bis zur Abbildung des Gesamtkollektors durch WKL-Parameter und die effektive Wärmekapazität eine konsequente Modellreduktion durchgeführt.

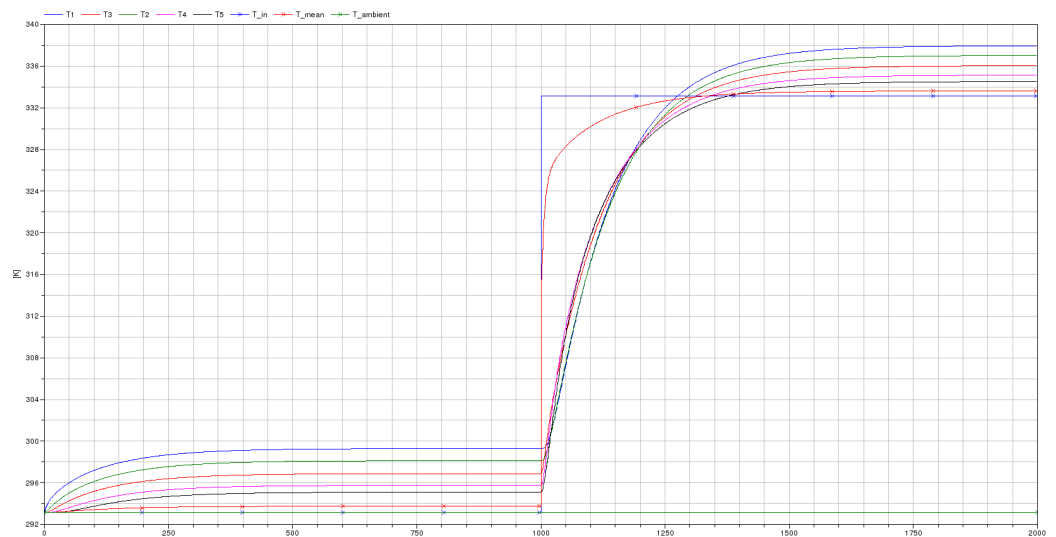


Abbildung 40: Temperaturverläufe des Modellabsorbers als Sprungantwort auf die Änderung der Eintrittstemperatur zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität nach EN 12975

2.4 Fertigungstechnologie – Membran-Vakuumentiefziehverfahren

Im Rahmen des Projekts sollten parallel zwei mögliche Verfahren zur Herstellung durchströmbarer Bauteile aus UHPC untersucht werden. Eines davon ist das vom Fraunhofer ISE entwickelte und patentierte Membran-Vakuumentiefziehverfahren. Dieses war bereits vor dem TABSOLAR-Projekt erfolgreich mit einer kalt aushärtenden Gießkeramik durchgeführt worden, jedoch noch nie mit UHPC. Erst das Zusammenspiel von Entwicklung geeigneter Materialien, Werkzeugkonstruktion und Prozessführung konnten hier zum Erfolg führen. Die Verfahrensschritte sind in Abbildung 41 beschrieben.

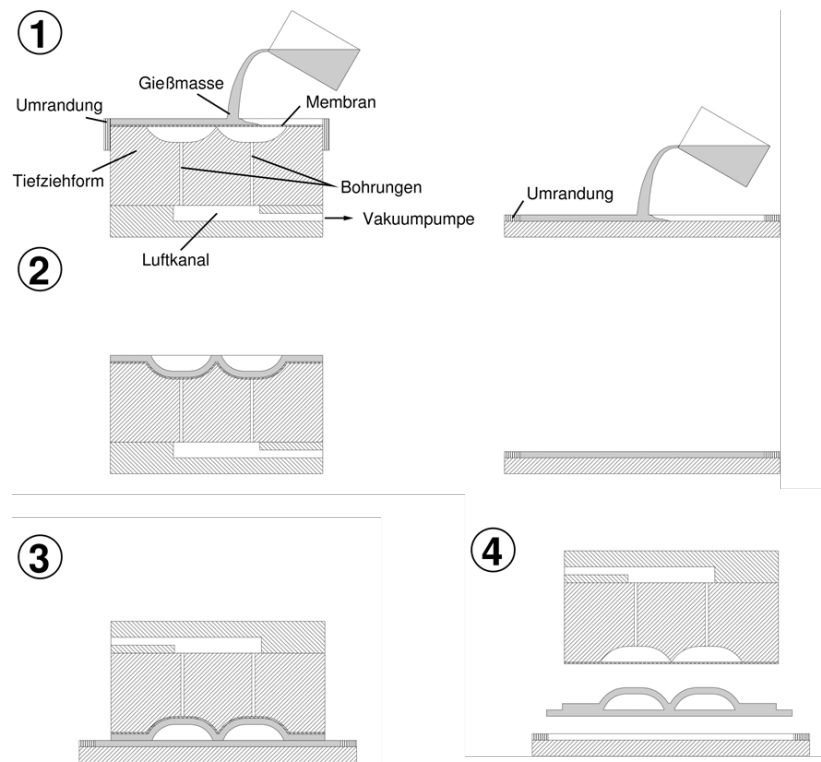


Abbildung 41: Grundsätzliche Schritte des vom Fraunhofer ISE entwickelten Membran-Vakuumtieftziehverfahrens: 1. Auftragen der Gießmasse, 2. Evakuieren der Tiefziehform, 3. Zusammenfügen von Ober- und Unterteil, 4. Entformen

2.4.1 Auslegung der Kanalstrukturen

Bei der Auslegung der FracTherm[®]-Strukturen mussten thermische, mechanische und fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden. Da jede Änderung der Geometrie sowohl den Kollektorwirkungsgrad F' als auch die Innendruckstabilität beeinflusst, musste die Entwicklung geeigneter Querschnitte iterativ zwischen Fraunhofer ISE (thermische Simulationen) und KIT (mechanische Simulationen) erfolgen. Fazit aus Abschnitt 2.3.1.1 war, dass die Wandstärke oben und unten jeweils 7 mm betragen sollte, um eine ausreichende Innendruckstabilität zu erreichen. In Abschnitt 2.3.2.1 wurde gezeigt, dass mit diesen Wandstärken bei 16 bzw. 32 Kanälen pro Meter Breite ein Kollektorwirkungsgradfaktor F' von 95,2 % bzw. 97,7 % erreicht werden kann. Bei 5 mm Wandstärke oben und unten sind die Werte niedriger, jedoch noch immer im Bereich guter Solarabsorber nach dem Stand der Technik. 16 Kanäle pro Meter Breite entsprechen einem Kanalabstand (Mitte zu Mitte) von 62,5 mm, 32 Kanäle führen zu einem Abstand von 31,25 mm.

Für das Musterelement wurde eine FracTherm®-Struktur auf einer Rechteckfläche von 330 mm x 430 mm erstellt. Diese wurde jedoch noch vergrößert, so dass auch Bogenstücke am Ein- und Austritt ergänzt werden konnten. Das Musterelement hatte somit eine Gesamtgröße von 340 mm x 460 mm. Bei der Auslegung der FracTherm®-Kanäle musste beachtet werden, dass die zu erzeugenden Rinnen der Tiefziehform die Außenkontur des späteren Bauteils und nicht die Kanalinnenwand darstellen. Somit musste ausgehend von den gewünschten Kanalquerschnitten unter Berücksichtigung der Wandstärke die Außenkontur konstruiert werden, woraus sich schließlich die effektiven Kanalbreiten für die Rinnen ergaben. Im FracTherm®-Programm werden nicht-rechteckige Kanalquerschnitte durch Korrekturfaktoren abgebildet, die den realen Querschnitt in Relation zu einem diesen Querschnitt umschreibenden Rechteck setzen. Neben einer geometrischen Korrektur wurden auch hydraulischer Korrekturfaktoren ϕ mittels CFD-Simulationen ermittelt. Der Unterschied zwischen dem durchströmten Querschnitt und der Außenkontur der Tiefziehrinne wurde durch entsprechende Offset-Werte berücksichtigt. Da der FracTherm®-Algorithmus auf binären Verzweigungen basiert, musste die Kanalanzahl eine Zweierpotenz sein. Es wurde eine FracTherm®-Struktur mit drei Iterationsstufen und damit acht Kanälen gewählt, was zu einem Kanalabstand von $330 \text{ mm} / 8 = 41,25 \text{ mm}$ führt. Dieser Wert liegt zwischen den oben genannten Werten 31,25 mm und 62,5 mm, so dass ein Kollektorwirkungsgradfaktor F' erwartet werden konnte, der ebenfalls zwischen den ermittelten Werten liegt.

Bei der Auslegung wurde festgestellt, dass eine Wandstärke von 7 mm auf der Unterseite zu sehr breiten FracTherm®-Kanälen und dies zu geometrischen Schwierigkeiten führt. Daher wurde entschieden, für die ersten Muster die Wandstärke auf der Unterseite auf 3 mm zu reduzieren, zumal die Innendruckstabilität zunächst noch nicht im Mittelpunkt stand. Abbildung 42 zeigt die Querschnitte der breitesten und der schmalsten Kanäle, Abbildung 43 die gesamte FracTherm®-Struktur, die die Ränder der zu erstellenden Tiefziehform abbildet.

0. Iteration
(breiteste Kanäle)

3. Iteration
(schmalste Kanäle)

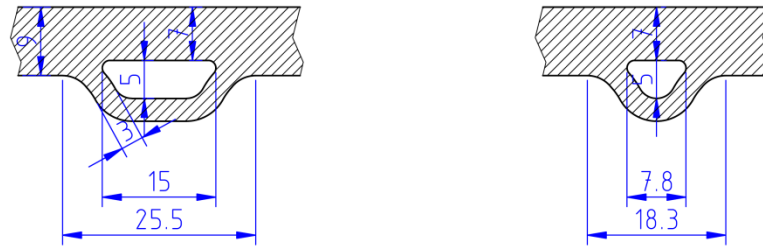


Abbildung 42: FracTherm®-Kanalquerschnitte der breitesten und der schmalsten Kanäle des Musterelements

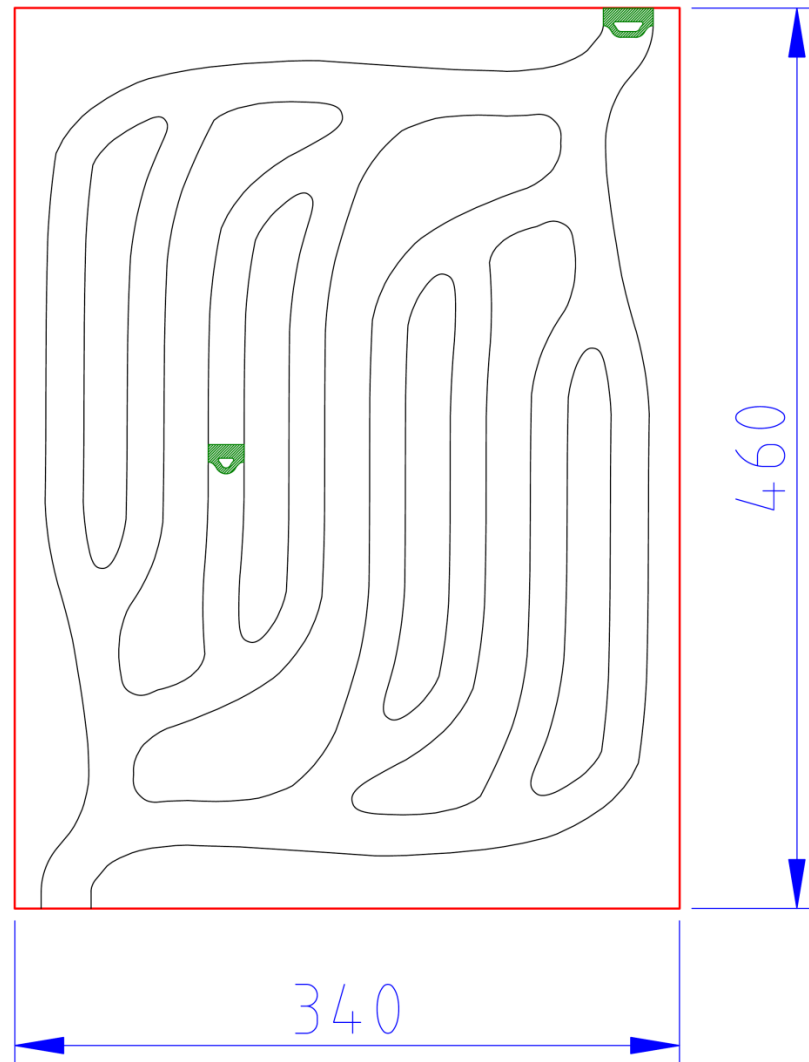


Abbildung 43: FracTherm®-Struktur des Musterelements mit beispielhaften Kanalquerschnitten (grün)

2.4.2 Fertigung und Bau eines Werkzeugs

Für die Durchführung des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens wurde ein Werkzeug konstruiert und gebaut (Abbildung 49). Kernelement des Werkzeugs ist ein Block, in den die Außenkontur der späteren Fluidkanäle als Rinnen eingefräst wird. In Abbildung 49 a) ist dieser Block noch ohne Rinnen zu sehen. Der Block wird später außerdem mit zahlreichen Bohrungen versehen, die eine Verbindung zu einem darunter liegenden Raum herstellen, aus dem die Luft abgesaugt werden kann. Der Block wird mit einer Silikonmembran überdeckt (Abbildung 49 b)), die mit einem Rahmen geklemmt und gespannt wird (Abbildung 49 c)). Dieser Teil des Werkzeugs ermöglicht das Tiefziehen einer Halbschale des TABSOLAR-Elements. Ein zweiter Teil des Werkzeugs dient der Herstellung einer ebenen Platte, mit der die Halbschale nach Drehen des ersten Werkzeugteils um 180° verbunden wird, während der UHPC in beiden Teilen noch frisch ist. Abbildung 49 d) zeigt das Werkzeug im zusammengebauten Zustand (später umgedreht, d. h. die Formplatte mit den Rinnen befindet sich dann oben).

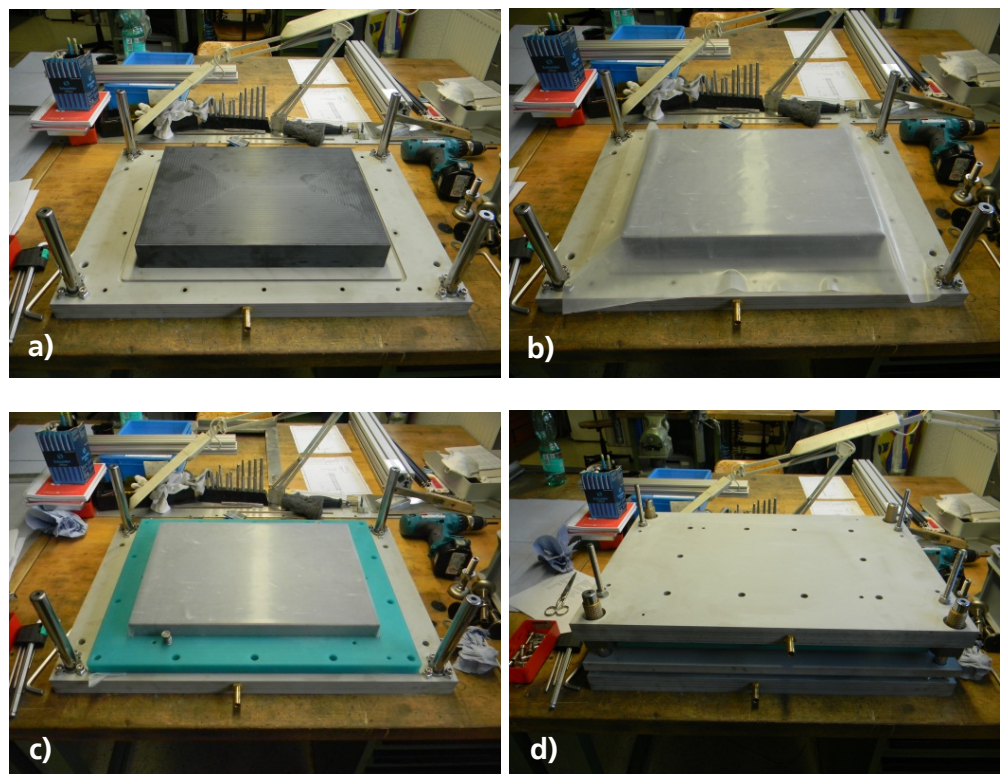


Abbildung 44: Werkzeug für das Membran-Vakuumtiefziehverfahren: a) späteres Oberteil mit Formplatte (noch ohne Kanäle), b) Silikonmembran aufgelegt, c) Silikonmembran geklemmt und gespannt, d) Werkzeug zusammengebaut (später umgedreht)

In Abbildung 45 ist die Formplatte mit der eingefrästen FracTherm®-Rinnenstruktur im Ausgangszustand und nach dem Evakuieren zu sehen.

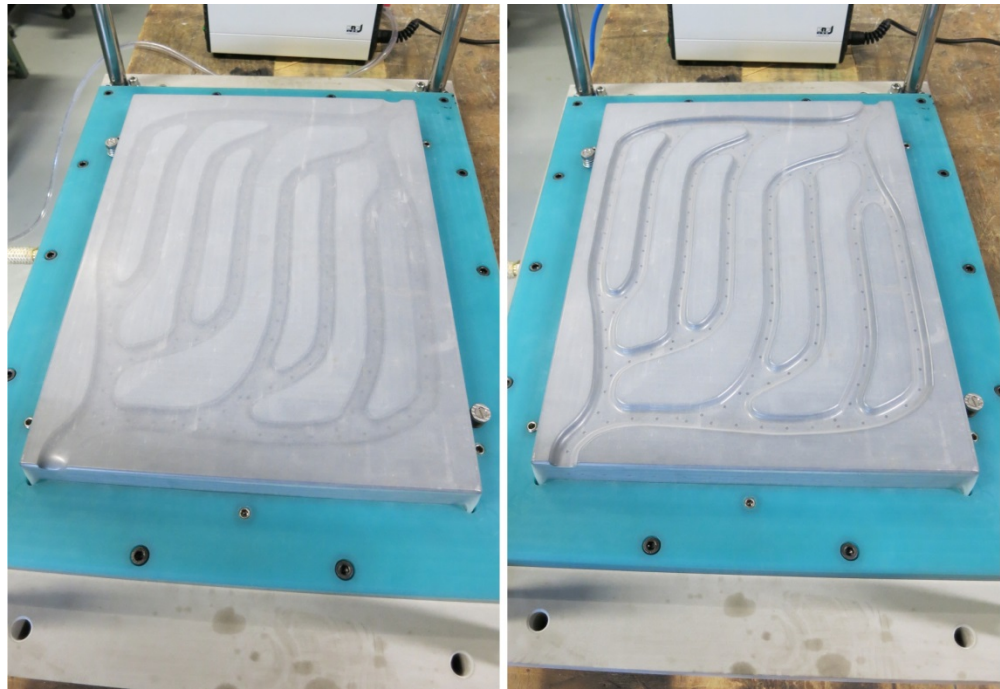


Abbildung 45: Formplatte mit eingefräster FracTherm®-Rinnenstruktur ohne (links) und mit Vakuum (rechts)

2.4.3 Herstellung von Mustern

Mit dem in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Werkzeug wurden bei Fa. G.tecz gemeinsam mit Fa. Spürgin und dem Fraunhofer ISE erste Musterbauteile mit Hilfe des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens hergestellt (Abbildung 46). Bei den Versuchen wurde die Fließgrenze und die Viskosität der eingesetzten Frischbetone variiert, um unterschiedliche Eigenschaften testen zu können. Hierbei konnte eine Einstellung des Frischbetons gefunden werden, welche reproduzierbar anwendbar ist. Zur Optimierung des Tiefziehprozesses wurden unterschiedliche Materialien und Materialstärken der Tiefziehmembran untersucht. Bei den Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Wahl des Ausgangsmaterials einen signifikanten Einfluss auf die Prozesstaktzeiten und die Oberflächenqualität des erzeugten Produkts hat. Neben der Wahl der Tiefziehmembran kann die zu beschichtende Sichtseite des TABSOLAR-Elements durch Einlegen eines beliebig gestalteten Strukturgebers beeinflusst werden. Für die Beschichtung der Betonoberfläche mit einer spektralselektiven Schicht werden ebene und glatte Oberflächen bevorzugt, da diese einen direkten Einfluss auf den Absorptions- und vor allem den Emissionsgrad haben. Im Rahmen der Untersu-

chung der Beschichtung hat sich gezeigt, dass eine Temperaturbehandlung der Betonzeugnisse vor dem Beschichten nötig ist. Hierbei wird physikalisch an den Beton angelagertes Wasser verdampft und somit entfernt, da dies den Sputterprozess negativ beeinflusst (siehe Abschnitt 2.6).

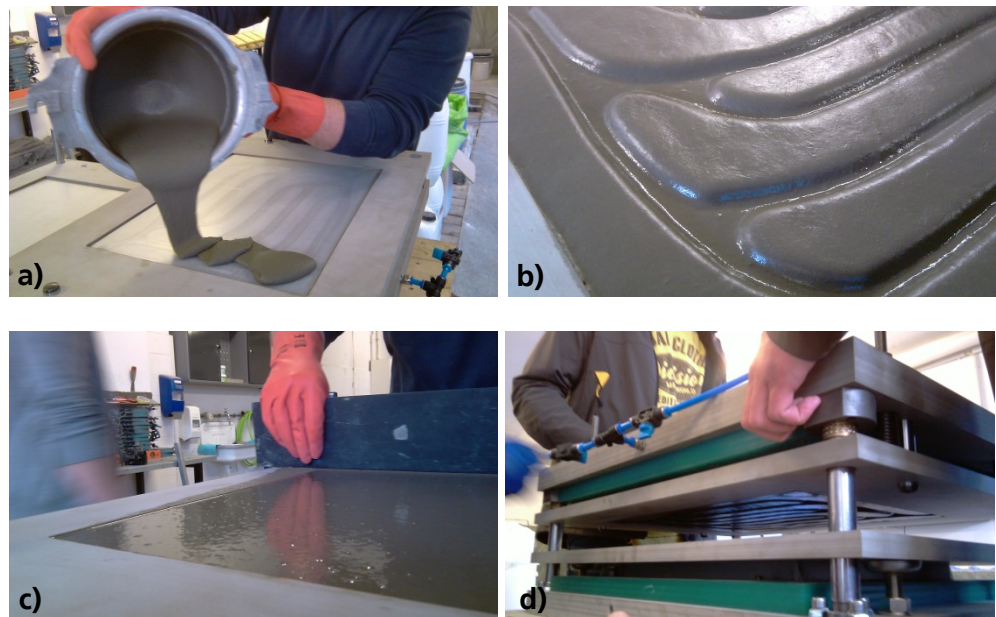


Abbildung 46: Durchführung des ersten Membran-Vakuumtiefziehversuchs mit UHPC: a) Auftragen des UHPC, b) FracTherm®-Struktur nach Tiefziehen, c) Abziehen der ebenen Platte, d) Zusammenfügen von Ober- und Unterteil (UHPC noch frisch)

Um den Energie- und Transportaufwand von kompletten TABSOLAR-Elementen zu minimieren, wurden Halbzeuge entwickelt. Die hergestellten Halbzeuge bestehen aus einer UHPC-Schicht mit einer Stärke von 3 mm, welche die zu beschichtende Seite darstellt. Auf der Rückseite der UHPC-Schicht ist halbseitig ein 3D-Gewebe von Visiotex eingebettet. Dieses Halbzeug wird nach dem Aufbringen der Sputterschicht in ein Schalungselement eingebracht und eine Rückseite aufgegossen sowie die Kanalstrukturen integriert.

Für die Anwendung von TABSOLAR-Elementen als Sichtelemente kann die sichtbare Oberfläche der Bauteile den gestalterischen Ansprüchen angepasst werden. In diesen Fällen kann die Bauteiloberfläche beliebig strukturiert oder der Beton eingefärbt werden. Abbildung 47 bis Abbildung 52 zeigen beispielhaft die erzeugten Muster und Oberflächen.



Abbildung 47: Hergestelltes TABSOLAR-Element

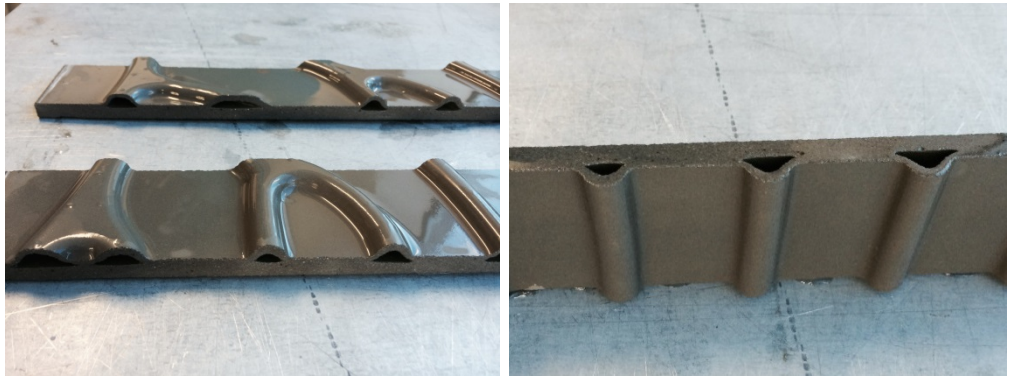


Abbildung 48: Schnitte durch das TABSOLAR-Element (links) und Detail (rechts)

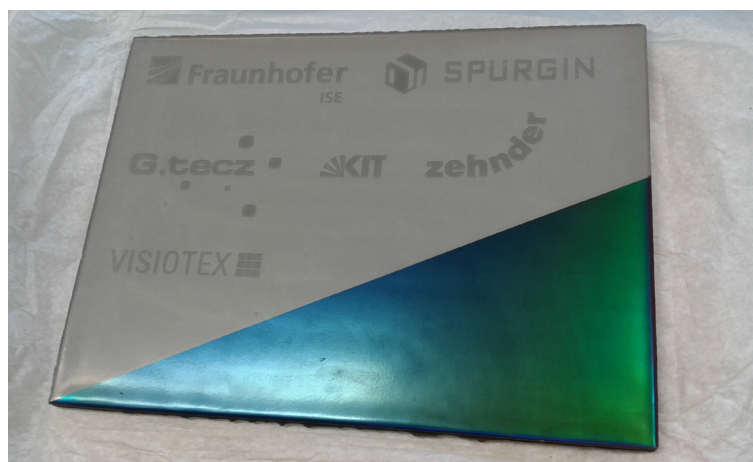


Abbildung 49: TABSOLAR-Element mit Relief und aufgebrachtter spektralselektiver Schicht mit unterschiedlichen Farben



Abbildung 50: Aufgebrachtes Muster zur Anwendung als Sichtelement

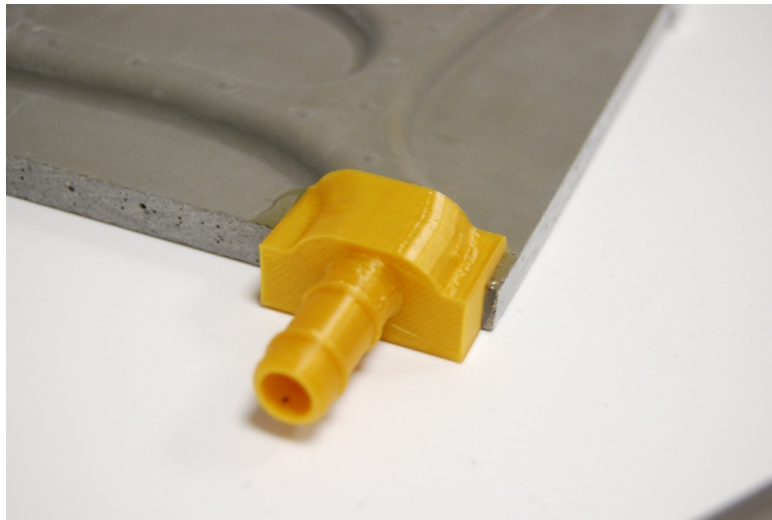


Abbildung 51: 3D-gedruckter Anschlussstutzen für Durchströmungsversuche

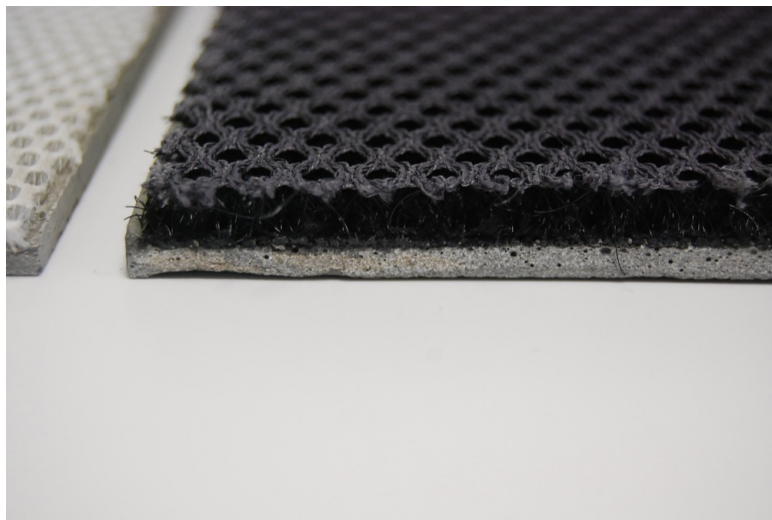


Abbildung 52: Halbzeug mit eingebettetem 3D-Gewebe

2.4.4 Planungen zur Fertigung eines 2-m²-Moduls

Anders als ursprünglich geplant gelang es während der Projektlaufzeit nicht mehr, ein 2 m² großes Modul zu bauen und zu vermessen. Es wurde jedoch bereits konkret überlegt, wie ein geeignetes Werkzeug zur Herstellung großer TABSOLAR-Elemente konstruiert werden kann, so dass es bereits produktionsrelevante Funktionen aufweist. So sollten beispielsweise das Einwenden des Oberwerkzeugs und die vertikale Positionierung beim Zusammenfügen von Ober- und Unterwerkzeug mit hoher Präzision und Reproduzierbarkeit durch Servomotoren erfolgen. Bei den Überlegungen wurde auch der Prozessablauf berücksichtigt, so dass eine wirtschaftliche Fertigung bei Firma Spürgin möglich wird.

2.5 Fertigungstechnologie – Umgießen von 3D-Textilien

Das zweite mögliche Verfahren zur Herstellung durchströmbarer Bauteile aus UHPC beruhte auf der Idee, zunächst eine Kanalstruktur aus dreidimensionalen Textilien herzustellen, diese anschließend mit Beton zu umgießen und dann z. B. durch Aufblasen bis zur Aushärtung aufzuweiten (Abbildung 53). Dieses Verfahren war bislang noch nicht getestet worden, weshalb zunächst die grundsätzliche Machbarkeit im Vordergrund stand.

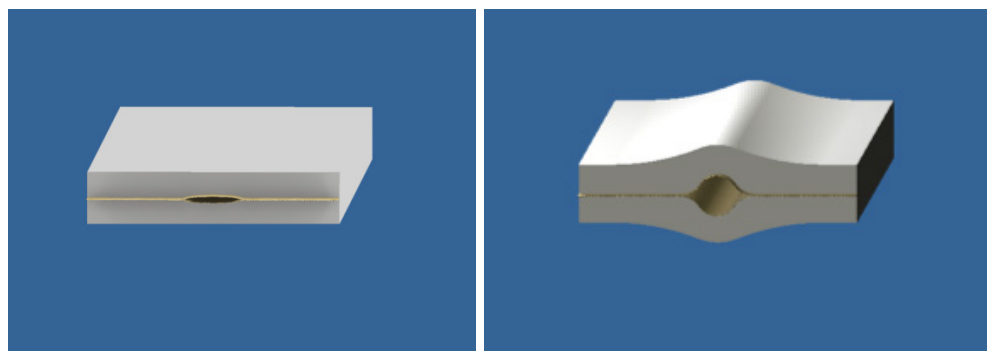


Abbildung 53: Prinzipielle Idee des Eingießens textiler Kanalstrukturen, links: Umgießen der 3D-Textilstruktur, rechts: Aufblasen bis zur Aushärtung

2.5.1 Auslegung der Kanalstrukturen

Um die prinzipielle Machbarkeit des Umgießens dreidimensionaler Textilien untersuchen zu können, wurde zunächst eine bereits existierende beispielhafte FracTherm[®]-Struktur für eine quadratische Fläche der Größe 40 cm x 40 cm ausgewählt und für erste Versuche an Fa. Visiotex geschickt (Abbildung 54). Bei dieser Struktur waren rechteckige Kanalquerschnitte angenommen worden. Da

es im ersten Schritt nur um die Machbarkeit und nicht um die Gleichmäßigkeit der Durchströmung und einen dafür notwendigen hydraulischen Abgleich ging, war der Unterschied zwischen realen und rechteckigen Querschnitten noch nicht relevant.

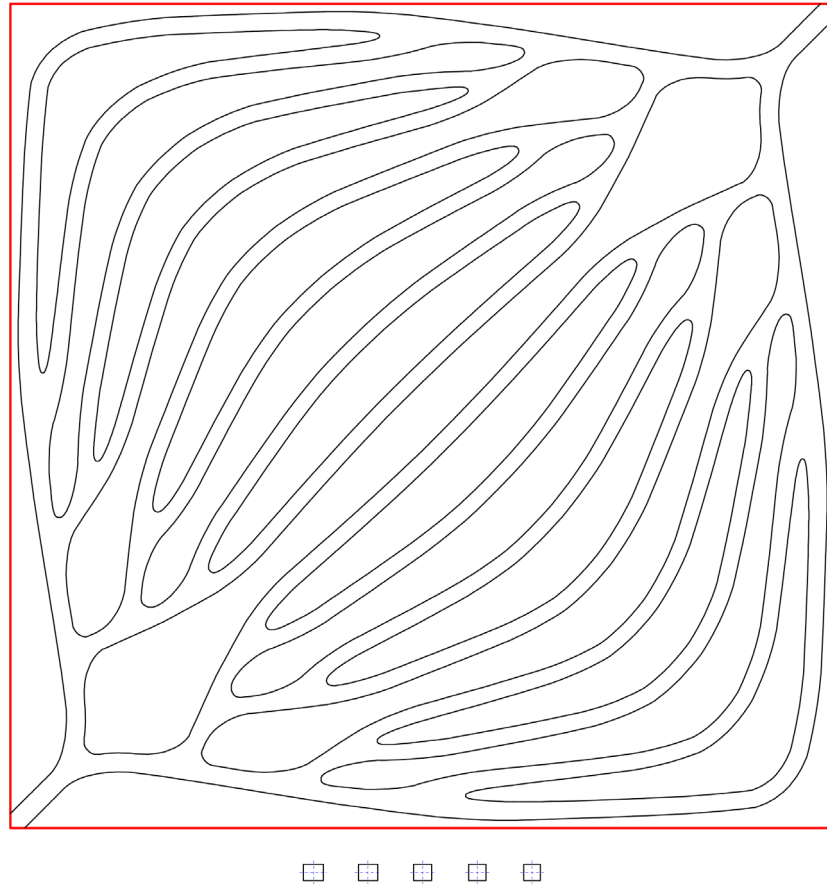


Abbildung 54: Beispielhafte FracTherm®-Struktur als Basis für erste Untersuchungen zu textilen Kanalstrukturen

2.5.2 Herstellung von 3D-Textilien

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung des Fertigungsverfahrens auf Basis von 3D-Textilien wurden erste textile Muster mit FracTherm®-Strukturen von Visiotex gefertigt (Abbildung 55 und Abbildung 56). Aus fertigungstechnischen Gründen wurden die FracTherm®-Strukturen bei diesen ersten Versuchen modifiziert. Die Kanalquerschnitte entsprachen noch nicht den späteren Querschnitten; es ging zunächst nur um prinzipielle Untersuchungen. Das erste Muster war bereits so gefertigt, dass die Kanäle nach beiden Seiten aufgeweitet werden können (siehe Abbildung 55, rechts), jedoch sind sie nach der Fertigung zunächst flach (siehe Abbildung 55, Mitte).



Abbildung 55: Erstes Textilmuster, beidseitig, ohne Vorformung der Kanäle



Abbildung 56: Zweites Textilmuster, einseitig, mit Vorformung der Kanäle

Zunächst wurden verschiedene Bindungsstrukturen in Kombination mit dreidimensionalen Kanalelementen aus unterschiedlichen Materialien entwickelt. Die Reproduktion der komplexen Kanalstruktur war uneingeschränkt möglich, eine thermische Nachbehandlung für eine notwendige Verschmelzung der Maschen ist allerdings fehlgeschlagen. Alternativ wurden die beiden Gestrickhälften (oben/unten) separat gefertigt, um anschließend die Bindungsstrukturen aus einer thermoplastischen Faser zu verschmelzen. Die homogenen Strukturen konnten permanent verklebt und als dichte luft-/flüssigkeitsführende Kanalgeometrie eingesetzt werden. Allerdings steht dieses Verfahren im direkten Wettbewerb zu konventionell gefertigten thermoplastischen Bauteilen (z. B. Spritzguss- oder Blasformteilen). Abgesehen von der höheren geometrischen Flexibilität (keine Notwendigkeit von Formwerkzeugen) sind hier kaum weitere Vorteile einer textilen Fertigung zu sehen; die Kosten werden jedoch als deutlich höher eingeschätzt.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Abdichtung mit eingearbeiteter Folie. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen geplant. Zielführend war auch die Herstellung einer Polfadenstruktur mit integriertem Kanalverlauf mit anschließender Folienkaschierung der Oberflächen zur Abdichtung. Fa. Visiotex verfolgt noch eine Variante mit aus Stärkefäden gefertigten Kanalstrukturen, die in den

Beton eingelegt und im Nachgang ausgespült werden - dadurch wird eine individuell gestaltete Röhrenstruktur freigelegt. Auch die Möglichkeit des Umstriekens derartiger Kanalstrukturen soll getestet werden.

2.5.3 Befüllen von 3D-Textilien

Um Kanalstrukturen innerhalb eines Betonelements zu erhalten, sollten die Kanäle des 3D-Textils der Firma Visiotex befüllt und das komplette Textil gemäß Abbildung 57 einbetoniert werden. Nach dem Erhärtungsprozess des Betons müssen die einbetonierten Gewebekanäle wieder entleert werden. Die durch diesen Prozess im Beton entstehenden Kanäle sollen später von einem Wärmeträgermedium durchströmt werden.



Abbildung 57: Textil mit FracTherm®-Struktur ohne Füllung

Die Schwierigkeit lag vor allem darin, ein für die Befüllung der Kanäle geeignetes Verfahren zu finden. Die ursprüngliche Idee, eine luftdichte Textilstruktur herzustellen und diese vor dem Umgießen mit UHPC aufzublasen, konnte nicht realisiert werden. Daher wurden Alternativen gesucht, um die Kanäle aufweiten und nach Aushärten des Betons wieder entleeren zu können. Die erste Überlegung war dabei, entweder ein Gießharz oder Silikon zu verwenden, das während des Trocknungsvorgangs flüssig bleibt und die Kanäle nach dem Entleeren abdichtet. Leider ergab sich durch zahlreiche Gespräche und gemeinsamen Erörterungen, dass das Ziel so nicht realisierbar ist. Als Hauptproblem wurde gesehen, dass der Abbindevorgang des Harzes auf einer größeren Fläche nicht kontrollierbar ist. Auch sollten die Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit für einen derartigen Prozess in etwa konstant sein, was jedoch bei der Herstellung von Betonfertigteilen nicht realisierbar ist.

Eine weitere Überlegung war, die Kanäle zunächst mit Salzkernen (Natriumchlorid) zu füllen, die sich im Leichtmetallguss bereits bewährt haben. Da sie keine weiteren Chemikalien enthalten und wasserlöslich sind, sind sie ökologisch unbedenklich und leicht mit Wasser ausformbar. Beim Füllen des Gewebes stellte sich jedoch heraus, dass die Kanäle aufgrund eines zu kleinen Durchmessers des Salzes nicht gefüllt werden können.

Bei der dritten Variante wurde schließlich EPS-Granulat (Abbildung 58) verwendet, das sich durch seine Stabilität und runde Körnung auszeichnet. Abbildung 59 zeigt den Befüllvorgang, Abbildung 60 das befüllte Textil.



Abbildung 58: EPS-Granulat

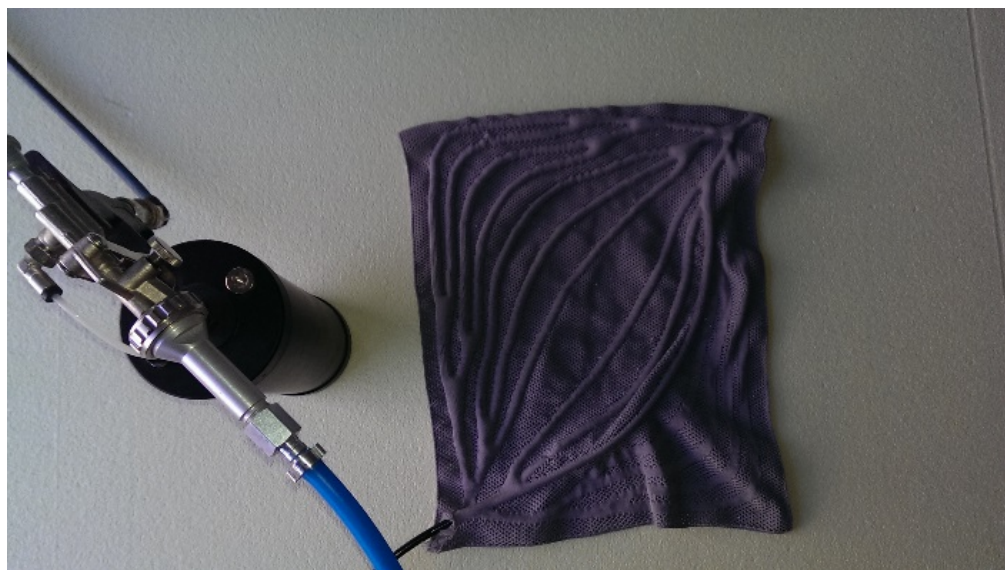


Abbildung 59: Einfüllen des EPS-Granulats in Textil

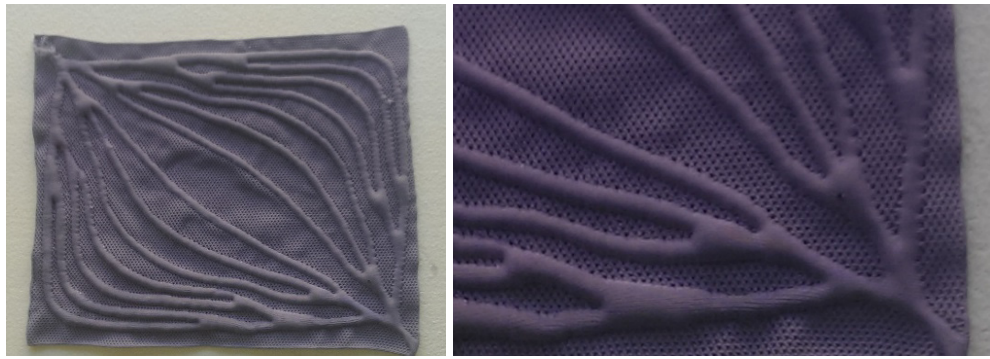


Abbildung 60: Befülltes Textil (links) und Detail (rechts)

Das Verfahren erwies sich prinzipiell als geeignet, um die Kanäle aufzuweiten. Jedoch zeigte sich, dass jeder Kanal separat befüllt werden muss, wodurch sich das Verfahren als sehr zeitintensiv gestaltet. Darüber hinaus wurde das Textil beim Einblasen des Granulats teilweise beschädigt (Abbildung 61). Es ist denkbar, den Befüllprozess zu optimieren, jedoch erscheint er im industriellen Maßstab insbesondere für die mehrfach verzweigten FracTherm®-Strukturen kaum als wirtschaftlich realisierbar.



Abbildung 61: Beschädigte Stellen an den FracTherm®-Kanälen, Austritt von Granulat (durch rote Farbe und Schrauben markiert)

2.5.4 Herstellung von Mustern

Auf Basis der mit EPS-Granulat befüllten Textilstruktur (siehe Abschnitt 2.5.3) wurde ein Betonmuster hergestellt. Dabei wurde noch kein UHPC verwendet. Zunächst wurde eine einfache Schalung gebaut (Abbildung 62). Die Überlegung, die Schalung stehend zu betonieren, erwies sich als nicht umsetzbar, weshalb

liegend betoniert wurde. Abbildung 63 zeigt den Vorgang des Einbetonierens des 3D-Textils, Abbildung 64 einen Schnitt durch das am nächsten Tag ausgeschalte Bauteil nach Entleeren der Kanäle. Grundsätzlich erwies sich die Herstellung durchströmbarer Bauteile auf Basis von mit Beton umgossenen 3D-Textilien als vorstellbar. Schwierigkeiten zeigten sich jedoch beim Entleeren der Kanäle nach dem Betonieren. Zudem fand keine ausreichende Verbindung zwischen oberer und unterer Betonschicht statt, weil das dazwischenliegende Textil eine Trennschicht darstellte. Die Textilstruktur zwischen den Kanälen müsste demnach deutlich grobmaschiger werden, was jedoch realisierbar sein sollte.

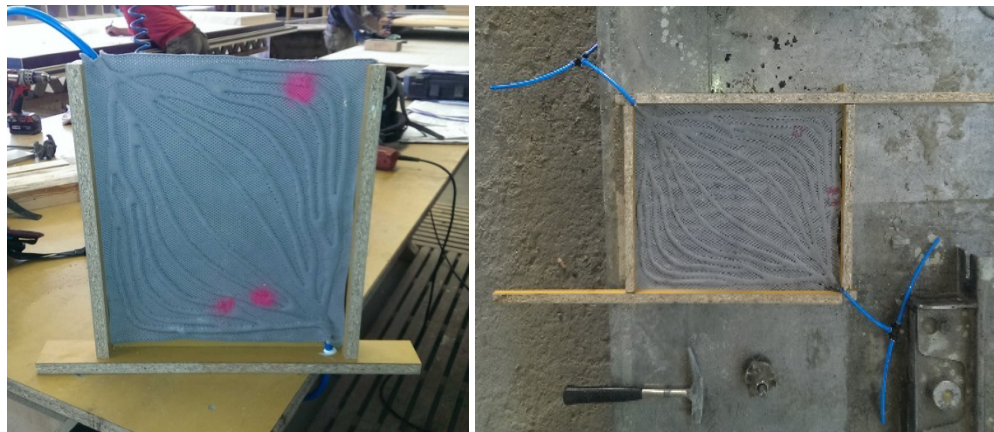


Abbildung 62: Einfache Schalung mit Textil (links); Schläuche (blau) für das Entleeren nach dem Betonieren (rechts)

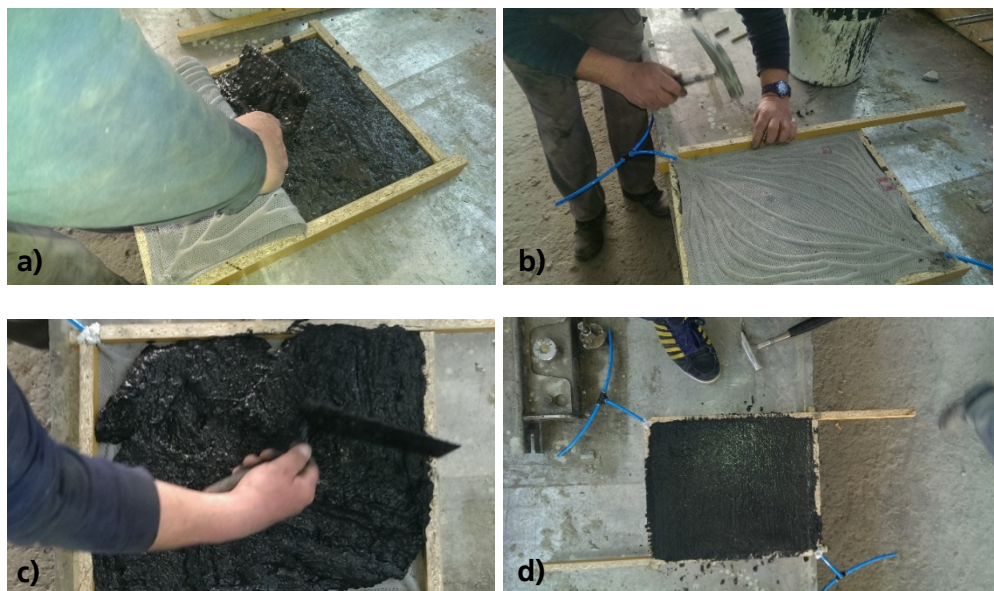


Abbildung 63: Einbetonieren der 3D-Textilstruktur: a) Auflegen des Textils auf untere Frischbetonschicht, b) Befestigen und Spannen des Textils an der Schalung mit Nägeln, c) Aufbringen der oberen Frischbetonschicht, d) fertig betoniertes 3D-Textil

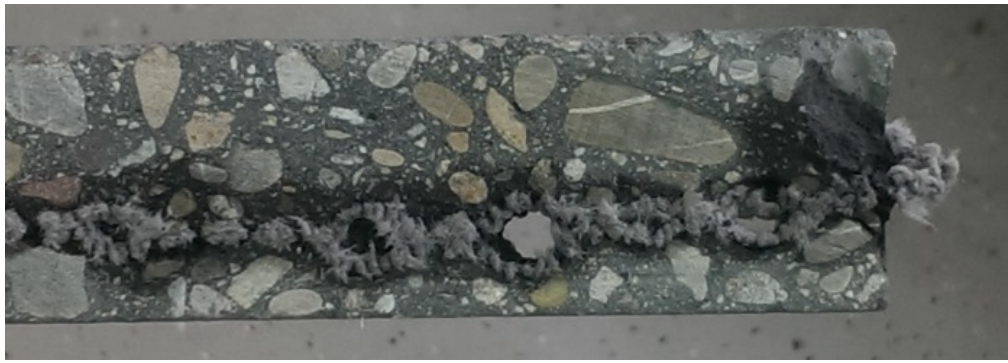


Abbildung 64: Schnitt durch das ausgeschalte Bauteil nach Aushärten des Betons und Entleeren der Kanäle

2.6 Spektralselektive Beschichtung

Solarabsorber nach dem Stand der Technik weisen in der Regel spektralselektive Beschichtungen auf, die sich dadurch auszeichnen, dass sie einen möglichst hohen Anteil der Solarstrahlung absorbieren (charakterisiert durch den Absorptionsgrad α) und gleichzeitig im Betrieb bei erhöhter Temperatur möglichst wenig Infrarotstrahlung emittieren (so genannter „IR-Spiegel“, charakterisiert durch den Emissionsgrad bei 100 °C $\epsilon_{100\text{ °C}}$), um die thermischen Verluste möglichst gering zu halten und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen. Eine Möglichkeit, spektralselektive Schichten herzustellen, besteht darin, sie durch Sputtern im Vakuum auf ein Substrat aufzubringen. Für Metallsubstrate ist dies inzwischen Stand der Technik, während eine Beschichtung auf anderen Substraten wie UHPC neu ist und daher noch erforscht und entwickelt werden muss. Insbesondere die Direktbeschichtung auf UHPC stellt dabei aufgrund des darin enthaltenen Wassers eine große Herausforderung dar, weil auf dem Substrat adsorbiertes Wasser im Vakuum desorbiert. Zum Teil findet diese Desorption bereits beim Abpumpen der Schleuse statt und verzögert den Abpumpvorgang, was den Beschichtungsdurchsatz senkt und dadurch die Beschichtungskosten steigen lässt. Zum Teil findet die Desorption aber erst während des Beschichtungsvorgangs statt, angetrieben durch eine Erwärmung beim Beschichten oder Plasmaeintrag. Dieses Wasser wird während des Sputterns durch das Plasma in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der entstehende Sauerstoff kann dann während des Sputterprozesses mit den Metallionen reagieren bzw. die bereits gesputterten Schichten angreifen und beispielsweise oxidieren. Im Falle des metallischen IR-Spiegels würde dies zu schlechten, also hohen, Emissionsgraden führen. Beim Cermet würde der Absorptionsgrad sinken und bei der AR-Schicht könnte es zu einer Reduzierung der Abscheiderate und damit zu einer zu geringen Schichtdicke der AR-Schicht kommen, was das Interferenzgefüge ungüns-

tig verschiebt. In einem begrenzten Maße können diese Einflüsse durch eine Anpassung der Prozessparameter ausgeglichen werden. Sind die Einflüsse des Ausgasens jedoch zu hoch, können Absorberschichten mit sehr hohem Absorptions- und sehr geringem Emissionsgrad nicht reproduzierbar abgeschieden werden.

2.6.1 Direkte Beschichtung auf UHPC

Um die Eignung von UHPC für das Vorhaben zu untersuchen, wurden unterschiedliche Proben von G.tecz hergestellt. Plattenförmige Proben unterschiedlichen Oberflächenstrukturen wurden am Fraunhofer ISE mit Hilfe des Sputterverfahrens spektralselektiv beschichtet. Die Oberflächenstrukturen reichten von glatt und spiegelnd bis ausgeprägt strukturiert. Es zeigte sich, dass glatte, ebene Oberflächen zu deutlich geringeren Emissionsgraden, und somit auch geringeren Wärmeverlusten, führen. Der Einfluss der Oberflächenstruktur auf den Absorptionsgrad α war dagegen deutlich kleiner. Es stellte sich heraus, dass nur auf einer glatten, ebenen UHPC-Oberfläche niedrige Emissionsgrade $\epsilon_{100^\circ\text{C}}$ um 10 % erreicht werden können. In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss unterschiedlicher UHPC-Mischungsrezepturen auf den Absorptions- und den Emissionsgrad untersucht. Dazu wurden sechs verschiedene UHPC-Proben, alle mit glatter Oberfläche, am Fraunhofer ISE spektralselektiv, ohne jegliche Optimierung, beschichtet (siehe Abbildung 65).

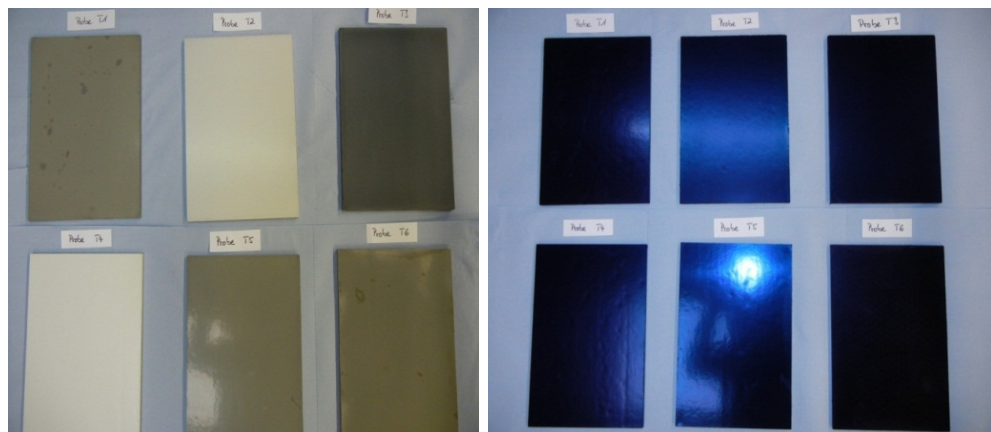


Abbildung 65: Unbeschichtete (links) und spektralselektiv beschichtete (rechts) UHPC-Proben

Es wurden durchweg sehr gute Absorptions- und Emissionsgrade gemessen. Der Absorptionsgrad lag bei allen UHPC-Proben um 94 %, der Emissionsgrad um 10 %. Als problematisch erwies sich die Haftfestigkeit der Schichten auf UHPC; lichtmikroskopische Untersuchungen wiesen darauf hin, dass sich nicht

nur die spektralselektive Schicht, sondern auch die oberste Betonschicht abgelöst hatte. Da dieser Effekt nicht bei allen Proben aufgetreten war, wurde von G.tecz vermutet, dass dies auf die unterschiedliche Alterung des UHPC zurückzuführen ist (Umwandlung physikalisch gebundenen Wassers in chemisch gebundenes); die Proben waren teilweise ausgeheizt worden, um sicherzustellen, dass sie vor dem Beschichten nahezu wasserfrei sind. Außerdem ist es möglich, dass das Aushärten in einer Holzschalung zu einer Austrocknung geführt hatte. Deshalb wurde nun weiter von G.tecz und Fraunhofer ISE untersucht, wie der Alterungsprozess zu führen ist, um eine ausreichende Haftung zu erhalten. Wärmebehandelte UHPC-Muster auf Basis der T1-Mischung wurden am ISE spektralselektiv beschichtet, anschließend optisch vermessen und hinsichtlich der Haftfestigkeit der Beschichtung untersucht (Abbildung 66).

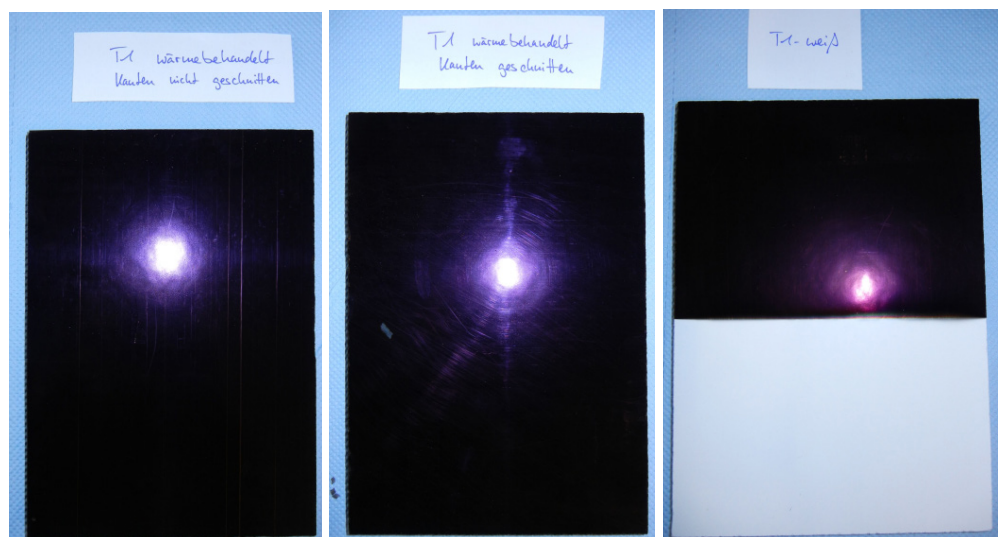


Abbildung 66: Spektralselektiv beschichtete UHPC-Proben

Die in den nun durchgeführten Beschichtungsversuchen eingesetzten UHPC-Proben waren zuvor in einer Silikonschale geformt (Kanten nicht geschnitten) bzw. der Randbereich der UHPC-Platte an Vergleichsplatten abgesägt worden (Kanten geschnitten), um eine Schwächung des Randbereichs ausschließen zu können. Die Reflexionsspektren sind in Abbildung 67 zu sehen.

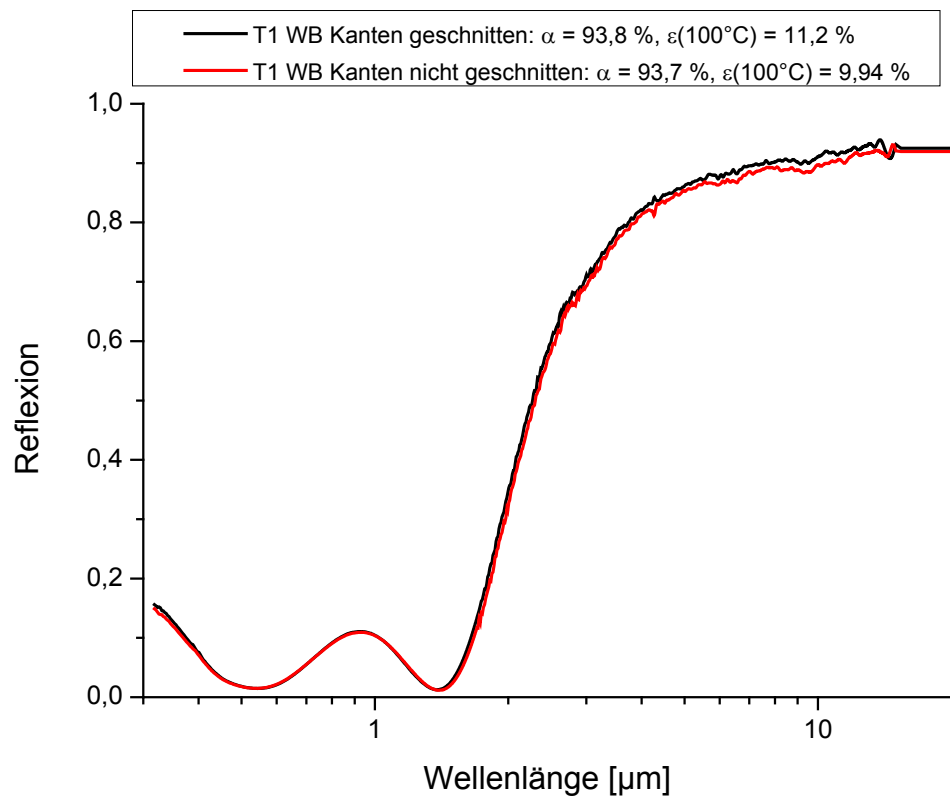


Abbildung 67: Reflexionsspektren der spektralsektiv beschichteten UHPC-Proben

Die Absorptionsgrade der UHPC-Proben waren mit fast 94 % durchweg gut. Der Emissionsgrad war für die in der Silikonschale ausgeformte, wärmebehandelte Probe T1 mit knapp 10 % am geringsten. Allerdings war die Beschichtung weiterhin durchweg nicht haftfest auf dem UHPC.

Zur Verbesserung der Haftfestigkeit der spektralselektiven Beschichtung auf dem UHPC wurde deshalb eine Inline-Oberflächenvorbehandlung („Sputterätzen“) getestet. Der Ätzprozess sollte hier zwei Zwecke erfüllen: Einerseits sollte durch Ionenbeschuss im Hochvakuum ein mechanischen Abtrag der immer vorhandenen Schmutz- und Wassermonolagen auf dem UHPC erfolgen, also eine physikalische Reinigung des UHPC stattfinden. Andererseits sollte dadurch eine Plasmaaktivierung erzeugt werden: An der Substratoberfläche erzeugte Radikale könnten die Schichthftung verbessern. Dazu wurden UHPC-Platten, die zuvor in einer Silikonschale geformt bzw. deren Randbereich an Vergleichsplatten abgesägt worden war, ohne weitere Vorbehandlung am ISE unterschiedlich stark der Inline-Oberflächenvorbehandlung ausgesetzt und anschließend ohne Vakuumbruch spektralsektiv beschichtet (siehe Abbildung 68).

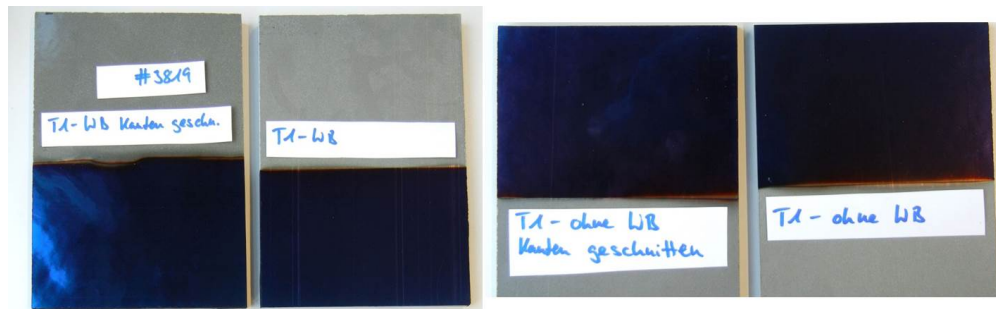


Abbildung 68: Inline-oberflächenvorbehandelte und anschließend spektralselektiv beschichtete UHPC-Platten. Haftfest direkt nach dem Beschichten.

Die Beschichtung war auf den UHPC-Platten über mehrere Monate nach dem Beschichten haftfest. Es wurden durchweg sehr gute Absorptionsgrade um die 94 % gemessen. Der Emissionsgrad war mit 12-16 % jedoch leicht höher als zuvor (siehe Abbildung 69).

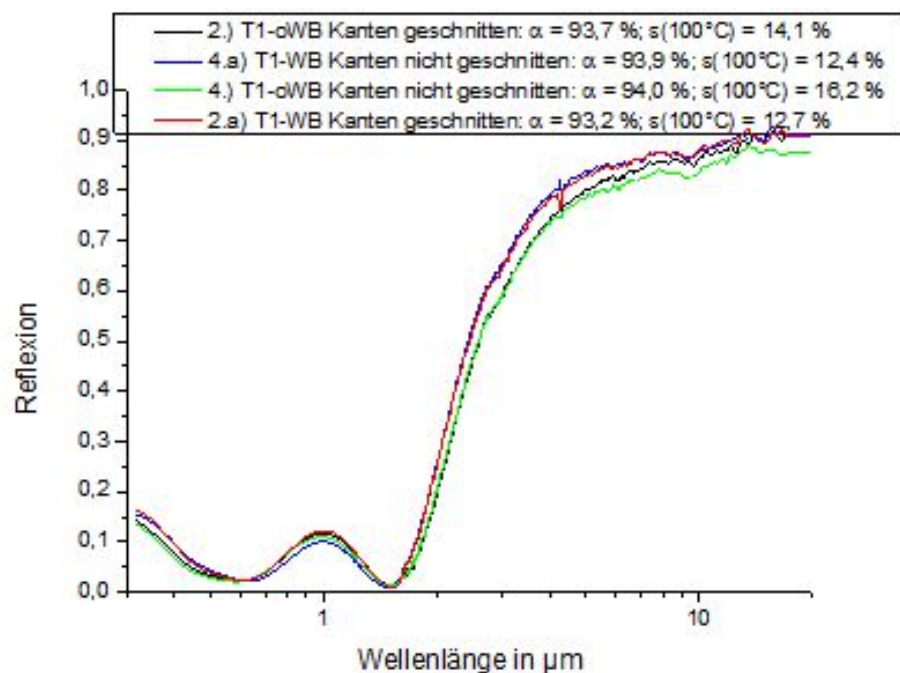


Abbildung 69: Reflexionsspektren der inline-oberflächenvorbehandelten und anschließend spektralselektiv beschichteten UHPC-Platten

Mit einem anderen IR-Spiegel als zuvor wurden sowohl sehr hohe Absorptionsgrade von über 94 % als auch sehr niedrigere Emissionsgrade von 6-8 % erzielt; allerdings war die spektralselektive Beschichtung trotz identischer Inline-

Oberflächenvorbehandlung nur wenige Tage direkt auf dem UHPC haftfest (siehe Abbildung 70).

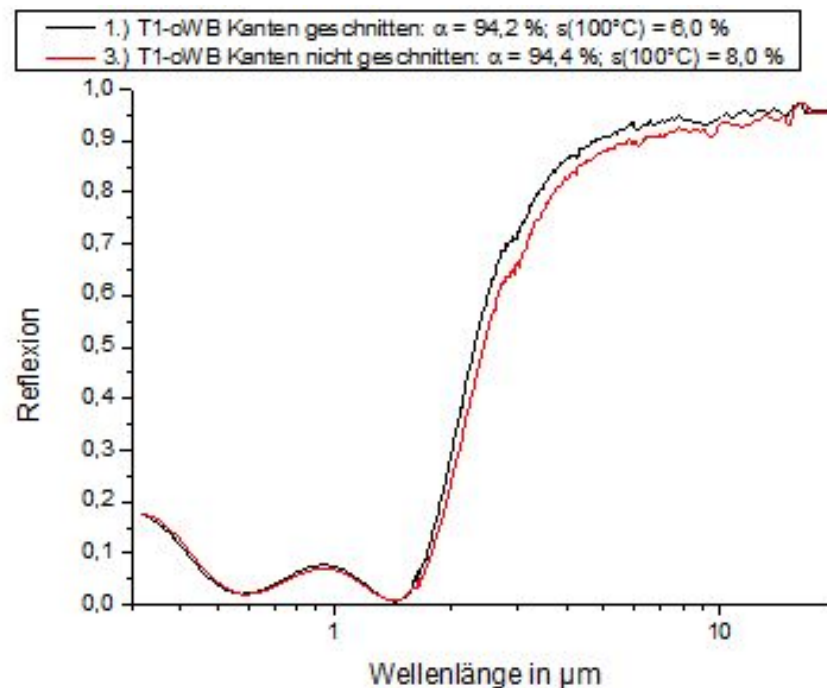


Abbildung 70: Reflexionsspektren der inline-oberflächenvorbehandelten und anschließend spektralselektiv beschichteten UHPC-Platten mit anderem IR-Spiegel

Weiterhin wurde untersucht, ob eine Entfernung der obersten Zementleimschicht des UHPC die Haftfestigkeit der selektiven Sputterbeschichtung auf dem UHPC erhöht. Dazu wurden von G.tecz UHPC-Platten halbseitig säurebehandelt und anschließend am Fraunhofer ISE spektralselektiv analog zu den vorangegangenen Versuchen beschichtet. Allerdings erwies sich die Beschichtung auf dem säurebehandelten Teil der UHPC-Platten als nicht haftfest (siehe Abbildung 71). Die raue Substratoberfläche führte außerdem zu sehr hohen und somit schlechten Emissionsgraden von rund 43 %, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde (siehe Abbildung 72).

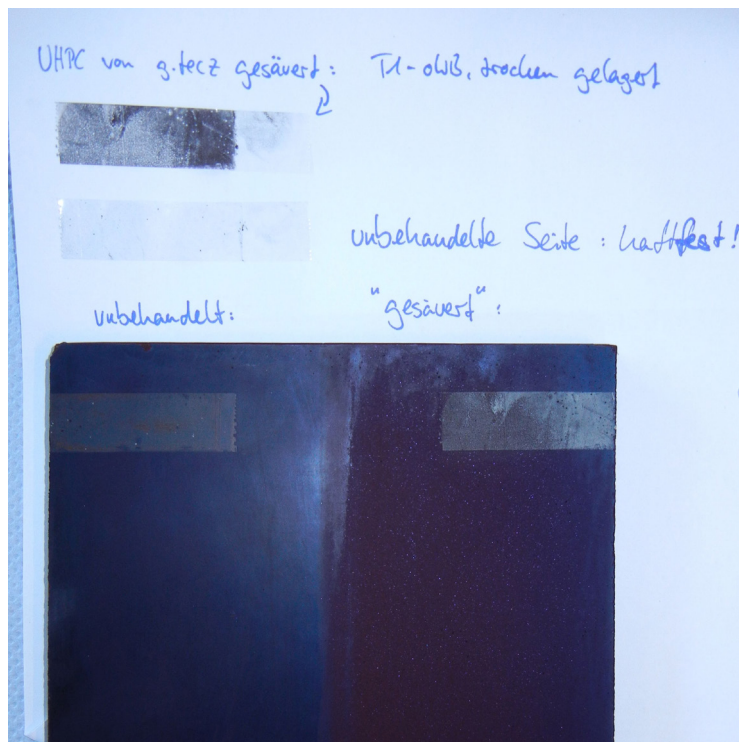


Abbildung 71: Vergleich der Haftfestigkeit der spektralselektiven Beschichtung auf säurebehandeltem UHPc (rechts) bzw. auf unbehandeltem UHPc (links)

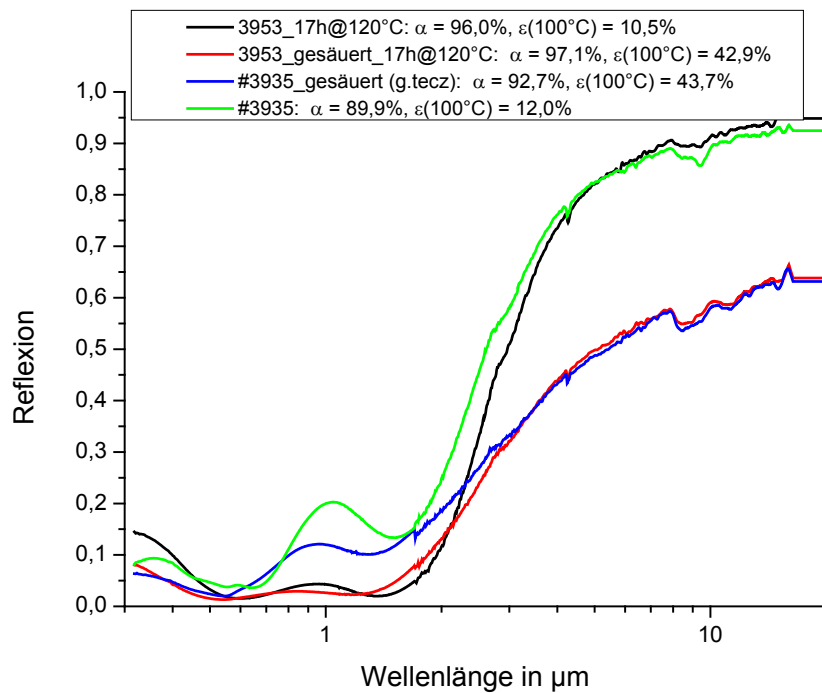


Abbildung 72: Vergleich der Reflexionsspektren von säurebehandeltem bzw. unbehandeltem spektralselektiv beschichteten UHPc

Außerdem zeigte sich, dass ein Ausheizen des UHPC direkt vor dem Beschichtungsprozess (17 h bei 120 °C) sowohl für einen hohen Absorptions- als auch für einen geringen Emissionsgrad essentiell sind (siehe Abbildung 73). Ohne vorheriges Ausheizen beträgt der Emissionsgrad 50 %, wohingegen nach vorheriger Wärmebehandlung ein niedriger Emissionsgrad von 11,5 % gemessen wurde. In Hinblick auf eine spätere industrielle Fertigung ist ein Ausheizen des UHPC direkt vor dem Hochvakuum-Beschichtungsprozess unabdingbar. Der Abpumpvorgang benötigt deutlich mehr Zeit als die eigentliche Beschichtung, bestimmt also maßgeblich die Durchsatzrate pro Tag. Lange Abpumpvorgänge führen zu weniger beschichteten Stückzahlen bzw. m² pro Tag und wirken sich somit unmittelbar auf die Produktionskosten aus. Zudem verhindert ein Ausgasen des UHPC im Hochvakuum während des Beschichtungsprozesses die Reproduzierbarkeit des Schichtsystems.

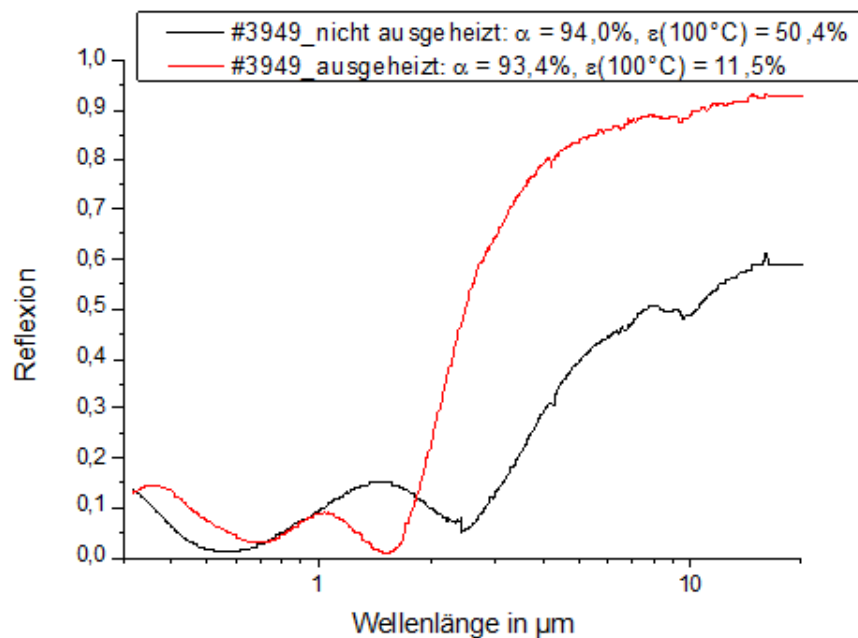


Abbildung 73: Vergleich der Reflexionsspektren von wärmebehandeltem bzw. unbehandeltem spektralselektiv beschichteten UHPC

Als dritte Möglichkeit, die Haftung der spektralselektiven Schicht auf dem UHPC zu verbessern, wurden zusätzliche oxidische und/oder metallische Haftschichten direkt auf dem UHPC getestet (siehe Abbildung 74).

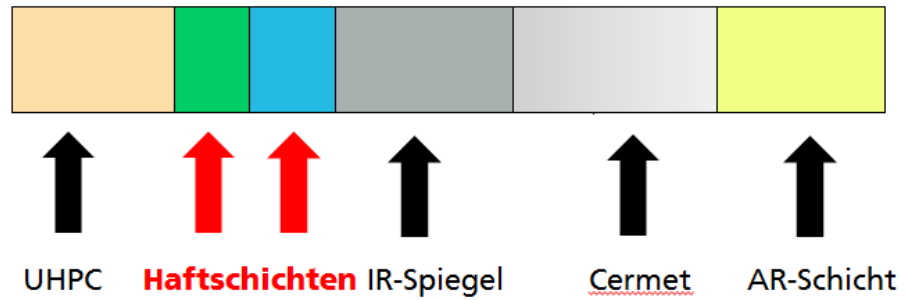


Abbildung 74: Zusätzliche Haftsichten direkt auf dem UHPC unter dem IR-Spiegel zu Verbesserung der Schichthaftung

Es wurde eine Reihe verschiedener oxidischer und/oder metallischer Schichten als zusätzliche Haftsicht unter dem metallischen IR-Spiegel getestet. Für ein Schichtsystem mit metalloxidischer Haftsicht direkt auf dem UHPC (grüne Haftsicht in Abbildung 74) gefolgt von einer metallischen Haftsicht (blaue Schicht in Abbildung 74) konnte ein über mehr als 4 Monate haftfestes spektralselektives Schichtsystem auf dem UHPC aufgebracht werden. 8 Monate nach dem Beschichten konnte jedoch die Schicht teilweise mittels eines Tesafilms abgezogen werden (siehe Abbildung 75). Diese Stelle wurde nochmals mittels FTIR-Spektrometer vermessen, um so die Auswirkungen auf die optischen Werte dieses Schichtsystems zu untersuchen (siehe Abbildung 76). Während der Absorptionsgrad mit fast 92 % nahezu unverändert hoch bleibt, steigt der Emissionsgrad von 12 auf über 35 % an, was zu erhöhten Wärmeverlusten führt. Diese Emissionsgrade liegen jedoch immer noch unter denen der säurebehandelten UHPC-Substrate und deutlich unter den Werten für nichtselektiv beschichteten UHPC. Der Verlust der Haftfestigkeit der spektralselektiven Schicht führt somit nicht unmittelbar zu einem Versagen des Absorbers. Es muss jedoch mit einer Zunahme der Emissionsgrade und somit der Wärmeverluste gerechnet werden.

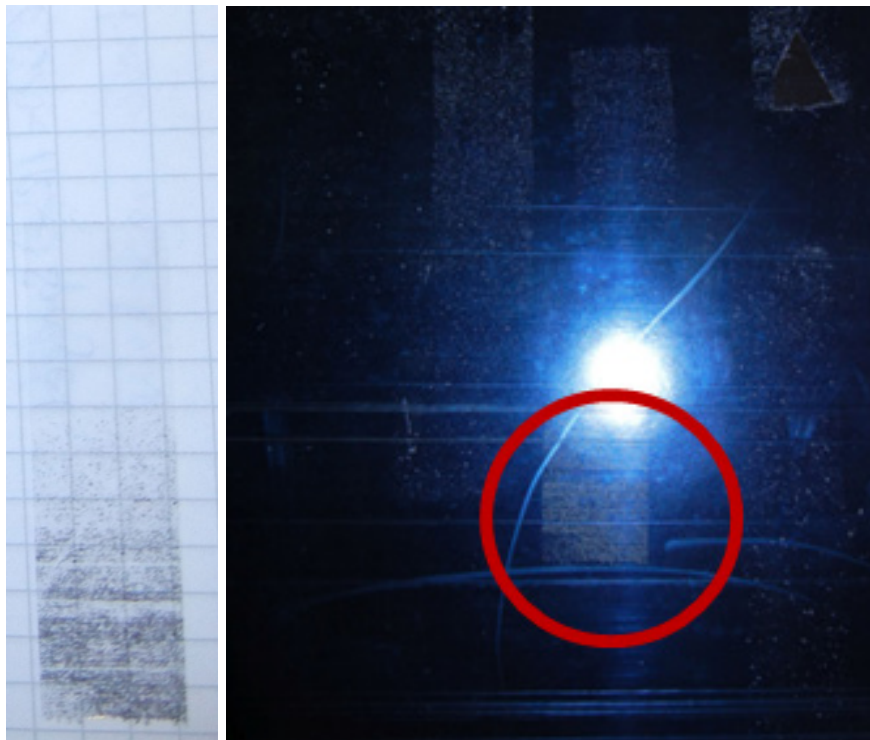


Abbildung 75: 8 Monate nach dem Beschichten teilweiser Abzug der spektral-selektiven Schicht mittels Tesafilm

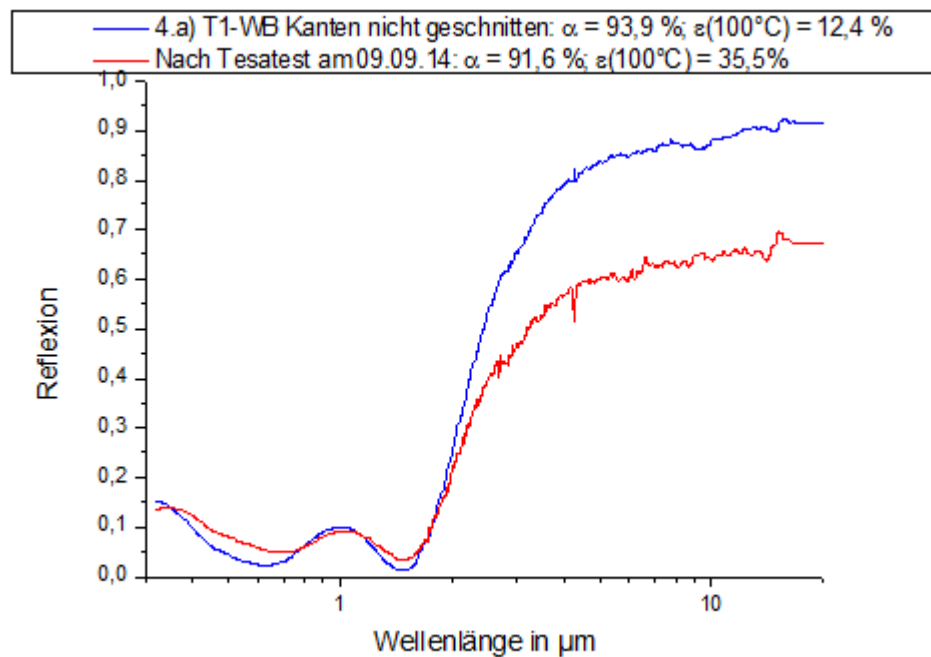


Abbildung 76: Vergleich der Reflexionsspektren direkt nach dem Beschichten (blau) bzw. nach teilweisem Abzug des Schichtsystems nach 8 Monaten (rot)

2.6.1.1 Komplette TABSOLAR-Elemente

Um die grundsätzliche Machbarkeit zu demonstrieren, wurde auch ein komplettes TABSOLAR-Element spektralselektiv beschichtet (siehe Abbildung 77).

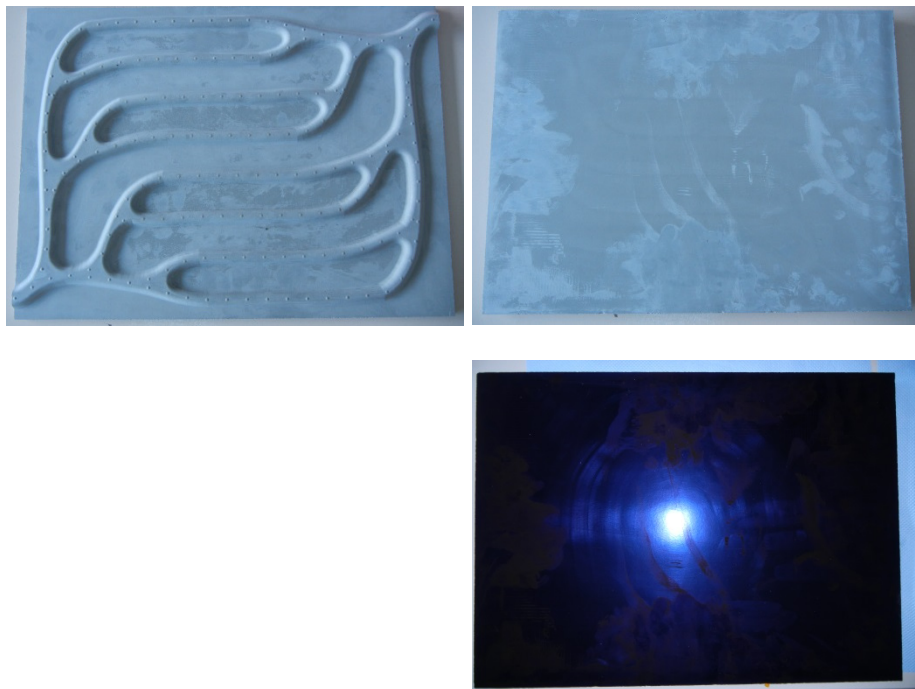


Abbildung 77: Komplettes TABSOLAR-Element vor dem Beschichten (oben) und nach dem Beschichten der ebenen Rückseite (unten)

Das spektralselektiv beschichtete TABSOLAR-Element wies mit fast 95 % einen sehr hohen Absorptionsgrad auf. Allerdings lag auch der Emissionsgrad mit 15,6 % recht hoch. Als Ursache dafür wird ein Ausgasen des im UHPC gebundenen Wassers während des Beschichtungsprozesses vermutet. Dadurch könnte der metallische IR-Spiegel angegriffen und somit sein Reflexionsvermögen im IR-Bereich geschmälert worden sein. Durch längeres Ausheizen vor der Beschichtung und/oder eine längere Lagerung des UHPC an Luft, wodurch das physisorbierte Wasser in chemisorbiertes Wasser umgewandelt wird, könnte dies verhindert werden.

2.6.1.2 Halbzeuge mit Textilien

Neben der Direktbeschichtung kompletter UHPC-TABSOLAR-Elemente wurde auch die Direkt-Beschichtung von UHPC-Textil-Halbzeugen untersucht. Die Beschichtung möglichst dünner Halbzeugsubstrate würde zum einen die gesamte Logistik erleichtern und wäre zum anderen auch für die spektralselektive Beschichtung vorteilhaft. Das geringere UHPC-Volumen würde das geschilderte

Ausgasproblem reduzieren. Außerdem könnten die beschichteten UHPC-Halbzeuge anschließend auf verschiedene Größen und Formen zugeschnitten werden, wodurch sich eine größere Gestaltungsfreiheit ergäbe. Am Fraunhofer ISE wurden dazu UHPC-Halbzeuge direkt spektralselektiv beschichtet (siehe Abbildung 78).

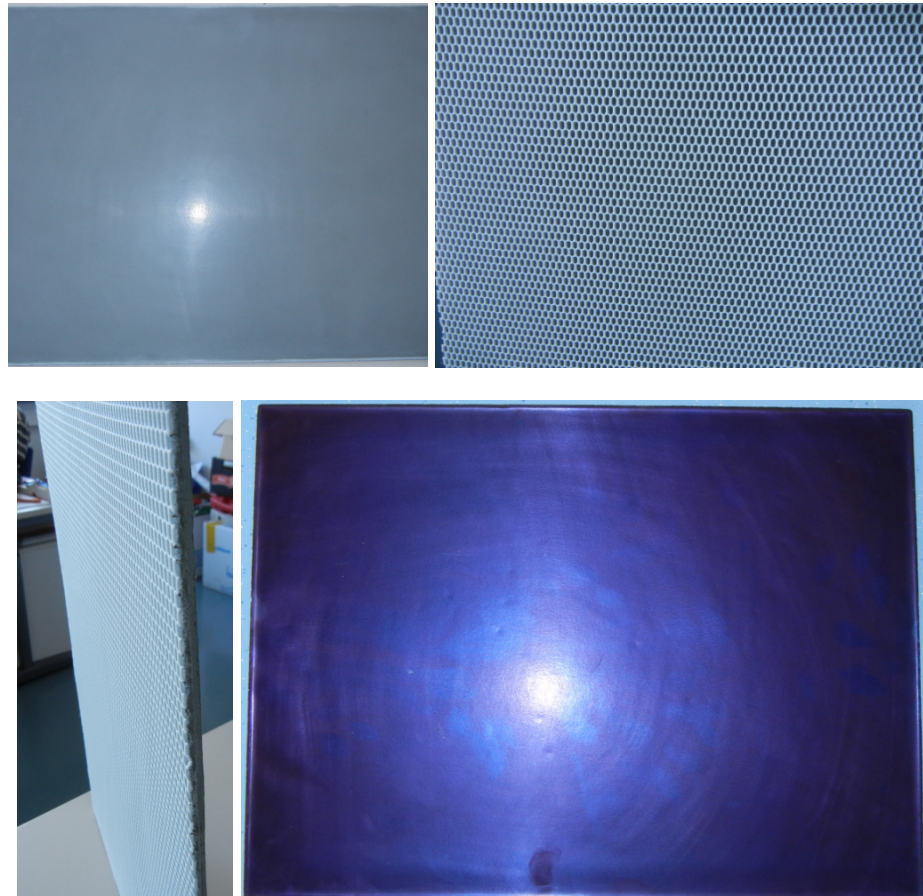


Abbildung 78: UHPC-Halbzeuge mit Textilien vor (oben und links unten) und nach der Beschichtung (rechts unten)

Neben der Direktbeschichtung des UHPC-Halbzeugs wurde auch ein UHPC-Halbzeug von G.tecz hergestellt, auf das auf der zu beschichteten UHPC-Seite Wasserglas aufgebracht wurde (siehe Abbildung 79). Die gemessenen optischen Werte waren sehr gut. Der Absorptionsgrad betrug fast 92 % und der Emissionsgrad war mit 7 % sehr gering. Im Gegensatz dazu weist das nicht wärmebehandelte UHPC-Halbzeug mit 18 % einen deutlich höheren Emissionsgrad auf. Die Unterschiede im Absorptionsgrad kommen dadurch zustande, dass das Schichtsystem noch nicht für das Wasserglas als Substratoberfläche optimiert wurde. Hier könnte durch weitere Optimierung ähnlich hohe Absorptionsgrade erreicht werden.

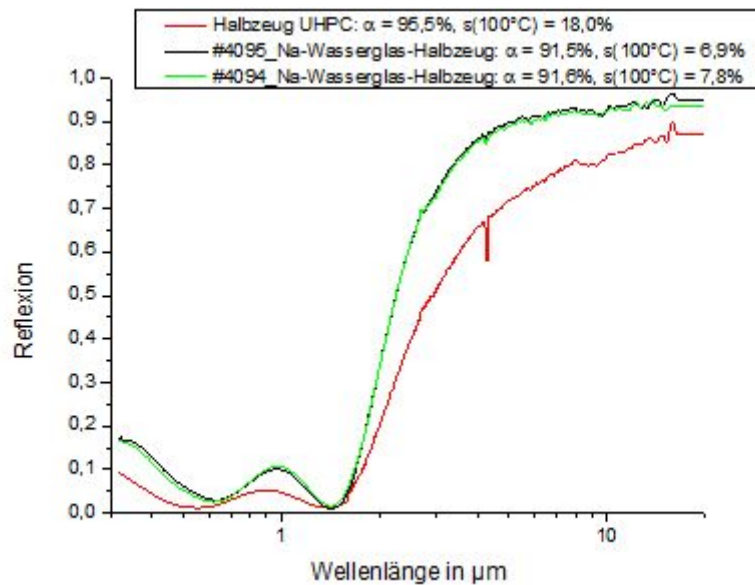


Abbildung 79: Vergleich der Reflexionsspektren der UHPC-Halbzeuge mit und ohne Wasserglas

Allerdings stellte sich heraus, dass das verwendete Wasserglas noch nicht ausreichend temperaturstabil war. Bei mehrstündiger Wärmebehandlung bei 45 °C konnte eine deutliche Rissbildung und bei Temperaturen von 90 °C eine leichte Blasenbildung beobachtet werden (siehe Abbildung 80).

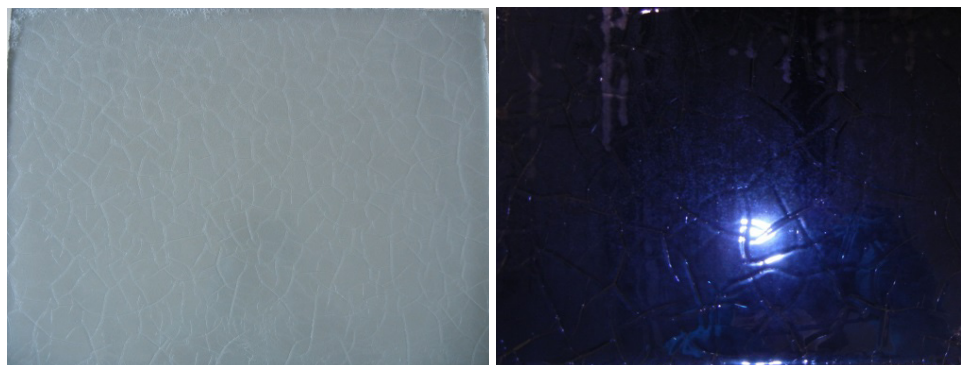


Abbildung 80: UHPC-Halbzeug mit Wasserglas nach der Wärmebehandlung (links) und nach anschließender Beschichtung (rechts)

Aufgrund der sehr guten optischen Werte und der Haftfestigkeit der spektralselektiven Schicht auf Wasserglas sollen im Rahmen eines Nachfolgeprojekts weitere Beschichtungsversuche auf temperaturstabilen Wassergläsern durchgeführt werden.

2.6.2 Beschichtung auf anderen Substraten

Beim 3. Projekttreffen wurde im Konsortium das Thema „spektralselektive Beschichtung“ diskutiert. Es bestand Einigkeit darin, dass eine direkte Beschichtung kompletter TABSOLAR-Bauteile unter Fertigungs-, Logistik- und Anwendungsaspekten unrealistisch ist. Problematisch sind insbesondere folgende Punkte:

- Die TABSOLAR-Elemente müssen 48 Stunden vor dem Beschichten getrocknet werden. Hier kann noch Restfeuchte vorhanden sein. Diese Restfeuchte kann das gewünschte Ergebnis bei der Beschichtung der Platten negativ beeinflussen.
- Nach 5 bis 10 Jahren könnte der Beton auskristallisieren und ggf. die Beschichtung beeinflussen, wodurch TABSOLAR-Elemente beschädigt werden können, was zu einem Problem der Gewährleistung führen würde.

Es wurden unterschiedliche Möglichkeiten diskutiert. Eine davon ist die Beschichtung auf Gewebe des Projektpartners Visiotex. Durch die Beschichtung des Gewebes könnte möglicherweise das inhärente Ausgasproblem des UHPC beim Sputterprozess umgangen werden. Das starke Ausgasen des UHPC verlängert u. a. die Abpumpzeit, verringert somit den Durchsatz pro Tag und erhöht somit die Produktionskosten. Ein weiterer Vorteil von Gewebe als Substrat stellt die einfachere Logistik dar. Die beschichteten Substrate ließen sich beispielsweise einfach aufrollen und zur Weiterverarbeitung transportieren. Das spektralselektiv beschichtete Gewebe könnte dann direkt im Betonfertigteilwerk in die Schalung eingelegt und mit Frischbeton übergossen werden. Sollten die Ergebnisse dieser Grundsatzversuche vielversprechend sein, wäre eine Schichtentwicklung auf Gewebesubstraten ein spannendes Thema für ein Nachfolgeprojekt. Darüber hinaus ist als weitere Alternative auch geplant, die Möglichkeiten sehr dünner UHPC-Gewebepplatten bzw. UHPC-beschichteter Gewebe zu untersuchen, die als Halbzeuge definiert ausgeheizt und anschließend spektralselektiv beschichtet werden könnten.

Die Anforderungen an das Gewebe stellen sich u. a. hinsichtlich einer thermischen Stabilität bis ca. 200 °C (Stagnationsfall), des Emissions- und Absorptionsgrads sowie des gesamten Verbunds spektralselektive Beschichtung/Gewebe/UHPC. Begleitend wurden hierzu Untersuchungen beim Projektpartner G.tecz bezüglich des Verbunds unterschiedlicher Gewebe der Firma Vi-

siotex mit UHPC durchgeführt (siehe Abschnitt 2.1.2). Am Fraunhofer ISE wurden vier verschiedene Gewebemuster spektralselektiv beschichtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 81 dargestellt.

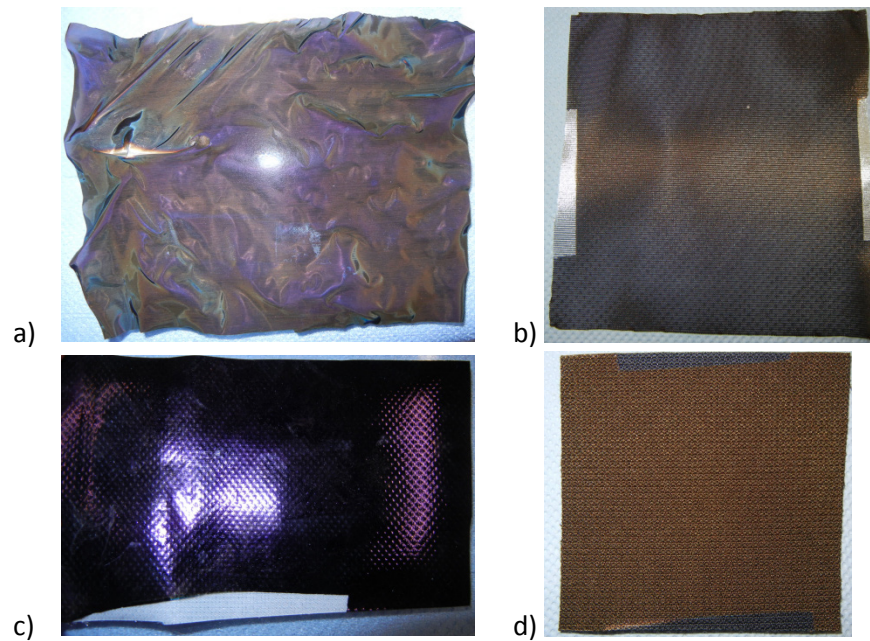


Abbildung 81: Am ISE spektralselektiv beschichtete Gewebemuster: a) Druckgewebe „gelb“, b) Silbergewebe „alu“, c) Silikongewebe „alu“, d) Verdeckgewebe „schwarz“

Während des Sputterprozesses kräuselte sich das Filtergewebe „gelb“ allerdings stark zusammen, was sich wahrscheinlich negativ auf den Emissionsgrad auswirkte. Das Silbergewebe „alu“ ist transparent. Der gemessene Absorptionsgrad stellt somit die untere Grenze dar – auf nichttransparentem Untergrund ist der Wert höher. Die spektralselektive Beschichtung war auf allen Gewebearten haftfest. Die Ergebnisse der optischen Messungen sind in Tabelle 7 gezeigt.

Tabelle 7: Absorptions- und Emissionsgrade der spektralselektiv beschichteten Gewebeprouben

Gewebeproube	Absorptionsgrad α	Emissionsgrad ε (100°C)
Druckgewebe „gelb“	81,6 ± 1 %	30,1 ± 2 %
Silbergewebe „alu“	65,8 ± 1 %	24,4 ± 2 %
Silikongewebe „alu“	94,6 ± 1 %	26,3 ± 2 %
Verdeckgewebe „schwarz“	92,4 ± 1 %	59,0 ± 2 %

Die ersten Beschichtungsversuche auf Gewebemustern lieferten teilweise mit dem UHPC vergleichbare Absorptionsgrade zwischen 92 und 95 %. Allerdings ist der Emissionsgrad noch durchweg zu hoch. Am vielversprechendsten erscheint hier das Silikongewebe mit 26 % Emissionsgrad bei fast 95 % Absorptionsgrad. Das Silbergewebe „alu“ ist semitransparent, weshalb der Absorptionsgrad entsprechend gering ist.

Ergänzend wurden auch handelsübliches Druckerpapier sowie Backpapier analog spektralselektiv beschichtet (siehe Abbildung 82).

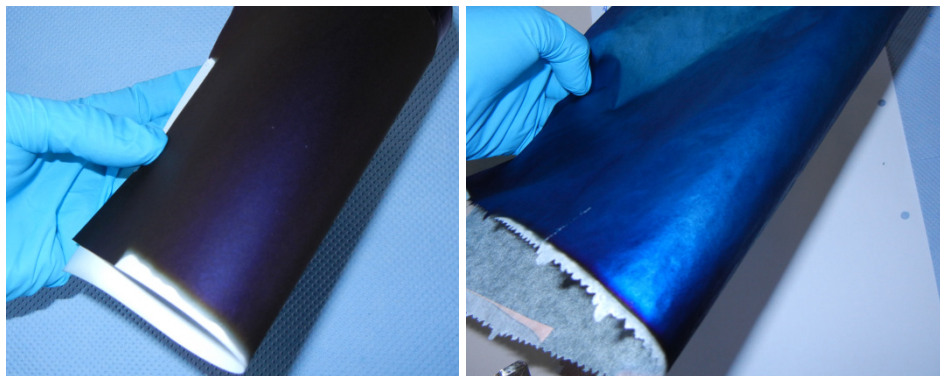


Abbildung 82: Am ISE spektralselektiv beschichtetes handelsübliches Druckerpapier (links) und Backpapier (rechts)

Die Reflexionsspektren zeigen für beide Papiersorten hohe Absorptionsgrade von 95 %. Allerdings ist der Emissionsgrad vor allem auf dem rauen Druckerpapier mit 32 % recht hoch (siehe Abbildung 83).

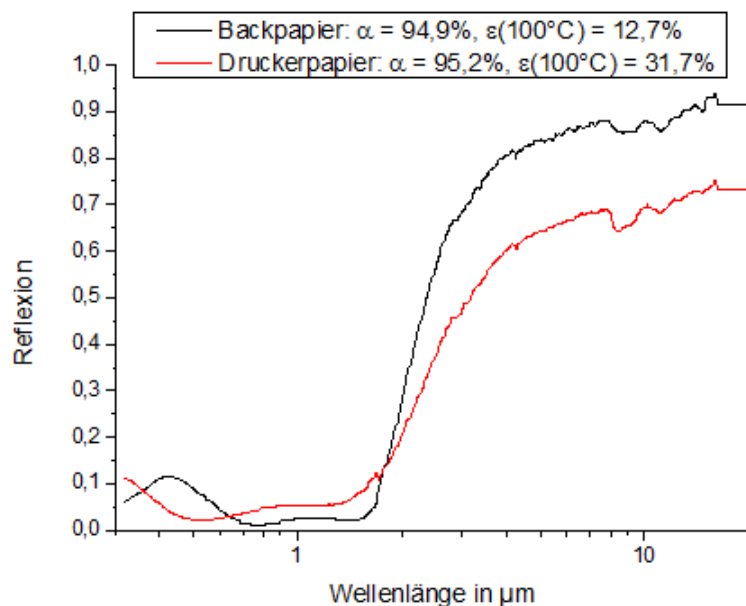


Abbildung 83: Reflexionsspektren der spektralsektiv beschichteten Papiersorten

Weitere Untersuchungen zur spektralsektiven Beschichtung auf anderen Substraten anstatt direkt auf UHPC könnten im Rahmen eines Nachfolgeprojekts fortgeführt werden. Die unterschiedlichen Varianten müssten auf ihre Tauglichkeit geprüft werden. Dabei sind insbesondere die thermische Ausdehnung, die Haftung der spektralsektiven Beschichtung sowie deren optische Eigenschaften von Bedeutung. Des Weiteren kann es notwendig sein, Diffusionsbarrieren zu integrieren, um die Beschichtung vor Degradation zu schützen.

2.7 Nichtselektive Beschichtung mit kommerziellen Solarfarben

Insbesondere für ungedeckte, kostengünstigere TABSOLAR-Varianten sind auch nichtselektive Beschichtungen bzw. durchgefärbte UHPC von Interesse.

Zum Vergleich wurden daher auch zwei kommerzielle Solarlacke auf UHPC-Platten aufgetragen (siehe Abbildung 84). Beide Solarlacke waren auf dem UHPC haftfest. Allerdings zeigt der Vergleich der Reflexionsspektren deutlich die Unterschiede zwischen einer spektralsektiven Beschichtung und den nichtselektiven Solarlacken (siehe Abbildung 85).



Abbildung 84: Nichtselektiv lackierte UHPC-Platten

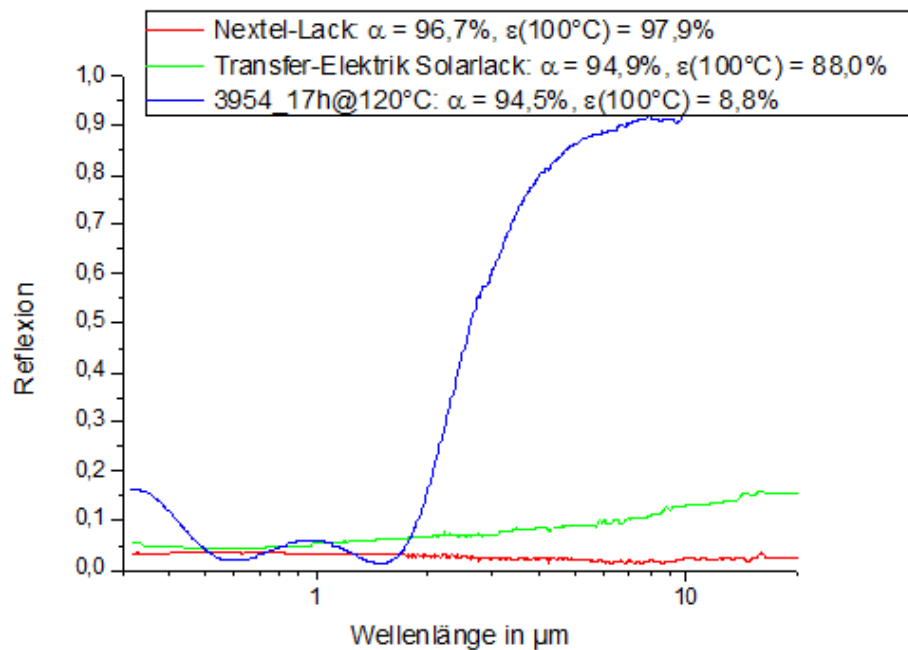


Abbildung 85: Vergleich der Reflexionsspektren von lackierten bzw. spektralselektiv beschichteten UHPC-Platten

Die Solarlacke weisen zwar sehr hohe Absorptionsgrade zwischen 95 und 97 % auf, jedoch sind die Emissionsgrade mit 88 bzw. 98 % und somit die Wärmeverluste durch Abstrahlung sehr hoch. Zum Vergleich ist auch das Reflexionsspektrum einer spektralselektiv beschichteten UHPC-Platte gezeigt. Ein lackiertes TABSOLAR-Element könnte jedoch in Verbindung mit einer Low-E-beschichteten Verglasung eine kostengünstigere Kollektorvariante darstellen. Auch diese Untersuchungen könnten im Rahmen eines Nachfolgeprojekts durchgeführt werden.

Ergänzend dazu wurden auch durchgefärbte, nicht beschichtete UHPC-Proben optisch vermessen (Abbildung 86).



Abbildung 86: Durchgefärbte UHPC-Proben

Dadurch sollte der farbige UHPC an sich auf sein Absorptions- und Emissionsvermögen hin untersucht werden. Es wurden sechs farbige UHPC-Platten mittels FTIR-Spektrometer vermessen. Anschließend wurden die Absorptions- und Emissionsgrade anhand der Reflexionsspektren bestimmt (siehe Abbildung 87).

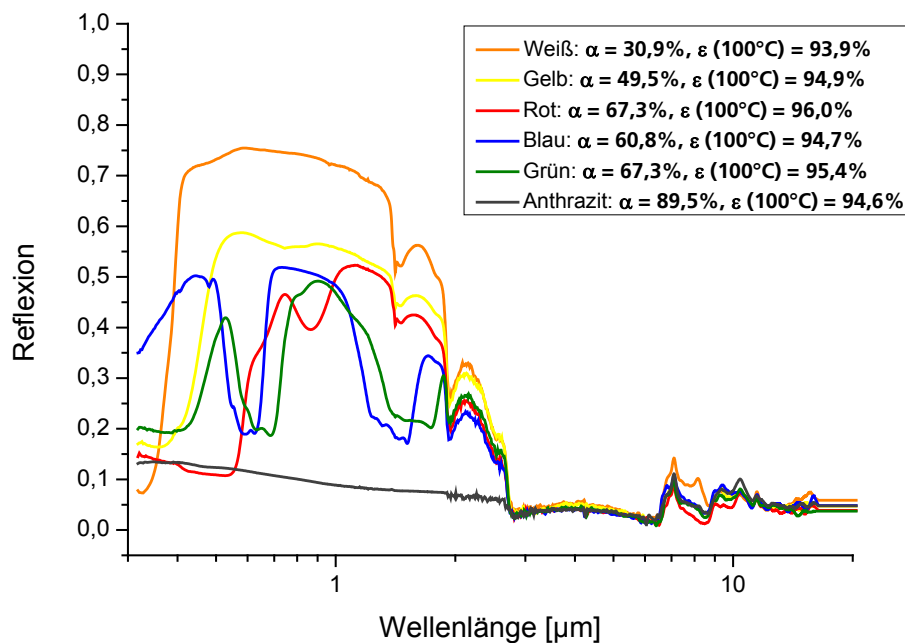


Abbildung 87: Reflexionsspektren der durchgefärbten, unbeschichteten UHPC-Proben mit zugehörigem Absorptions- und Emissionsgrad

Die Ergebnisse bestätigten die Erwartung, dass die dunkelsten Proben am stärksten absorbieren (rot, grün, anthrazit). Allerdings war auch der Emissionsgrad mit 94-96 % und somit der Wärmeverlust durchweg sehr hoch. Durchgefärbte UHPC-Proben allein, ohne eine zusätzliche Beschichtung, sind somit als Solarabsorber nur bedingt geeignet, da ein entsprechender Kollektor in seiner Anwendung, besonders im Winter, stark eingeschränkt wäre. Für Niedertemperaturanwendungen, insbesondere mit einem Fokus auf sommerlicher Nutzung, kommen sie jedoch in Frage (z. B. Schwimmbadheizung).

2.8 Konzeption von TABSOLAR-Elementen

Grundsätzlich können TABSOLAR-Elemente unterschiedlich stark in ein Gebäude integriert sein. Den geringsten Integrationsgrad würde ein separater Kollektor oder Flächenheizkörper darstellen, der lediglich an einer Außen- oder Innenwand befestigt wird. Damit würden lediglich bestehende Produkte substituiert, was jedoch nicht Idee des TABSOLAR-Konzepts ist. Ziel ist vielmehr, dass TABSOLAR-Elemente integrale Bestandteile eines Gebäudes werden. Dies betrifft Herstellung, Installation und Nutzung. Den höchsten Integrationsgrad würde ein multifunktionales Bauteil nach der Vision von Abbildung 1 darstellen, das auch die tragende Funktion einer Wand oder Decke übernimmt. Da ein hochintegriertes Bauteil mangels einfacher Austauschmöglichkeit einen wesentlich höheren Anspruch an die Zuverlässigkeit und Lebensdauer hat, werden erste Produkte zunächst einen „mittleren Integrationsgrad“ aufweisen. Dies bedeutet, dass es sich zwar um multifunktionale Bauteile handelt (im Fall der Fassade: Witterungsschutz, Wärmedämmung, Solarkollektor), die in einem integralen Fertigungsprozess hergestellt werden, jedoch insbesondere die statische Funktion auf das Tragen des Eigengewichts beschränkt und nicht auf das Tragen anderer Bauelemente ausgeweitet wird. Damit erscheint auch eine Austauschbarkeit in einem bestehenden Gebäude im Havariefall oder nach Ende der Lebensdauer realistisch. Erweisen sich derartige Produkte als zuverlässig, ist das hochintegrierte Bauteil entsprechend der Vision von Abbildung 1 als Zukunftsoption mit zu erreichender hoher Lebensdauer nach wie vor als Forschungs- und Entwicklungsthema relevant.

2.8.1 Feuchtehaushalt und Wärmedämmung

Die Integration einer Solarabsorberschicht aus UHPC in den Fassadenaufbau beeinflusst die auftretenden Schichttemperaturen im Jahresverlauf in der Fassade. Ein Feuchteausfall im Fassadenaufbau erscheint möglich, welcher die Funk-

tionalität der Fassade beeinträchtigen könnte, insbesondere bei einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer ISE dynamische hygrothermische Simulationen zur Bewertung des Feuchteausfalls in der Fassade im Jahresverlauf durchgeführt. In der Simulationsumgebung WUFI+ wurden TABSOLAR-Fassadenvarianten abgebildet, um den Feuchtegehalt über die Simulationsdauer mehrerer Jahre zu quantifizieren.

Die Randbedingungen für die Simulation lauteten wie folgt:

- Variante: **Abgedeckter** Sollarkollektor mit Verglasung (siehe Abbildung 88)
- Standort: **Freiburg**
- Fassadenausrichtung: **Süden**
- **Aktivierung der UHPC-Absorberschicht** mit 80 % der einfallenden Solarstrahlung (aus Annahmen für Transmission durch Glasabdeckung und Absorption der UHPC-Schicht)
- **Stagnationsfall**: Zunächst wird ein Wärmetransport über ein Wärmeträgerfluid nicht berücksichtigt
- **Stoffwerte**: Soweit möglich, wurden Stoffwerte für UHPC aus projektinternen Messungen verwendet. Für nicht verfügbare Stoffwerte wurden Literaturwerte für Standardbeton verwendet.
- **Zwei Feuchtelasten**:
 - Großraumbüro mit Feuchtelast durch Arbeiter (1 Person pro 10 m² Nutzfläche, Erwachsener, sitzend, mittlere Tätigkeit)
 - Extremfall mit 10-facher Feuchtelast

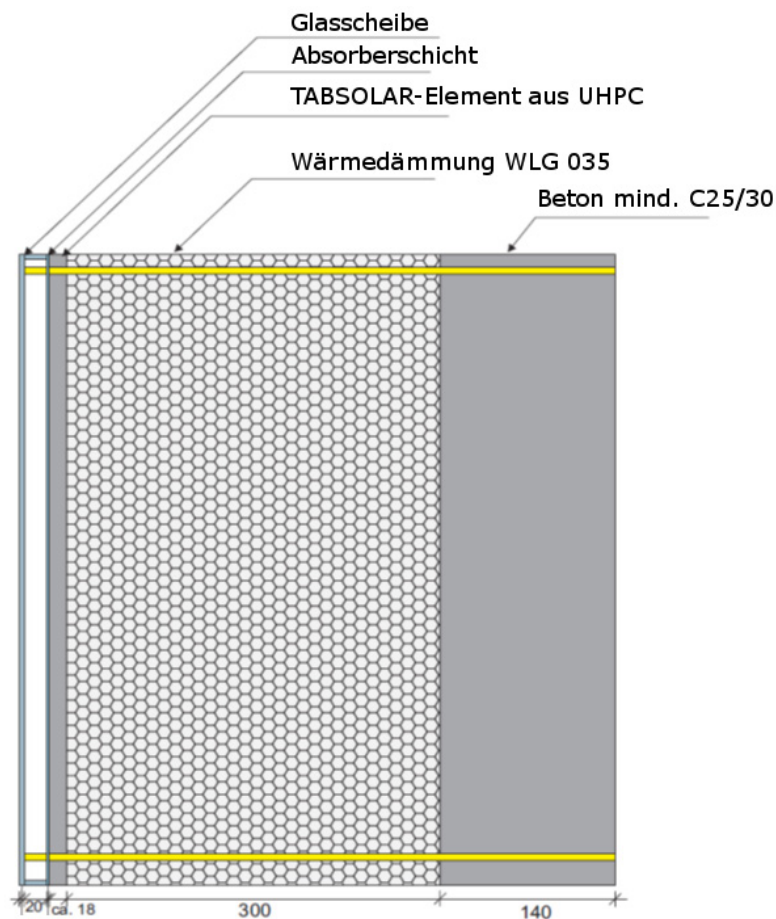


Abbildung 88: Schematischer Aufbau der Fassade

Die Ergebnisse zeigen keinen erhöhten, sondern einen sinkenden Feuchtegehalt von ca. 85 kg/m^3 auf ca. 40 kg/m^3 in der TABSOLAR-Fassade im Jahresverlauf (siehe Abbildung 89: sinkender Wassergehalt in der UHPC-Schicht, mit schwarzen Kreisen gekennzeichnet). Aufgrund der im Jahresverlauf hauptsächlich höheren Temperaturen im Fassadenaufbau durch die Solarabsorberschicht ist der Feuchtegehalt in der UHPC-Schicht geringer als in einer konventionellen Fassade. Bei einem Betrieb der Fassade als Solarkollektor sind daher ein Feuchteausfall und dadurch verursachte Schäden unter diesen Randbedingungen eher nicht zu erwarten. Allerdings sind insbesondere für die unabdgedeckte Fassadenvariante, vor allem in Kombination mit einer Wärmepumpe und damit niedrigeren Fassadentemperaturen, weitere Untersuchungen notwendig.

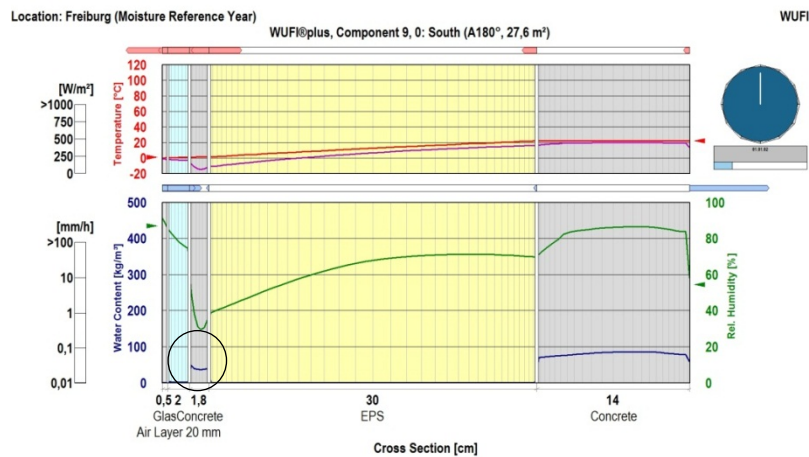
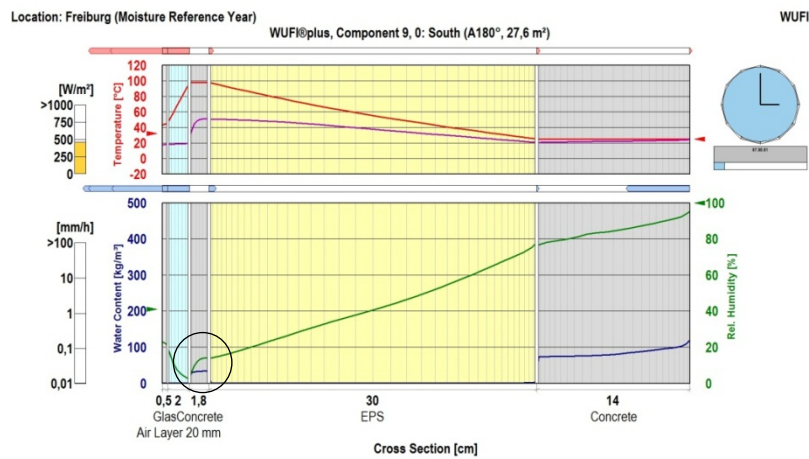
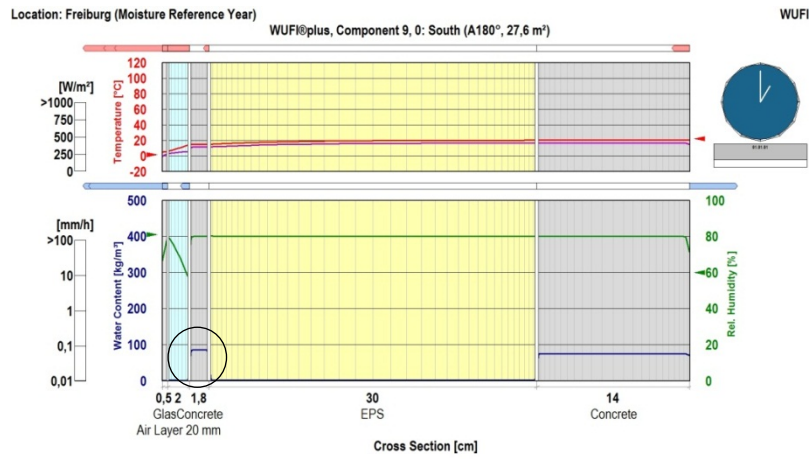


Abbildung 89: Temperatur (rot), Taupunkttemperatur (lila), Wassergehalt (blau) und relative Feuchte (grün) im Fassadenquerschnitt für 1. Jan. 01:00 (oben), 07. Aug. 15:00 (Mitte) und 31. Dez. 24:00 (unten)

Zu Beginn des Projekts war Firma Spürgin zunächst von einer Verwendung eines Halbfertigteils oder einer Sandwichwand mit expandiertem Polystyrol (EPS) ausgegangen. EPS wurde in Betracht gezogen, weil es bei Firma Spürgin bereits

eine große Rolle in der Fertigung spielt. Es ist in Blöcken am Markt erhältlich und erreicht ein Höchstmaß an Flexibilität und Effizienz. Die Überlegung war, EPS als Trägermaterial für das TABSOLAR-Element zu verwenden, so dass nur der Verbund zwischen Tragschale und EPS hergestellt werden müsste (Abbildung 90).

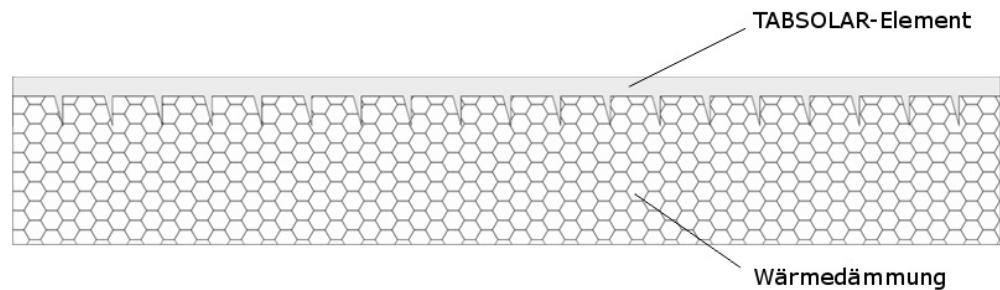


Abbildung 90: Konzept einer direkten Verbindung von TABSOLAR-Element und EPS-Wärmedämmung

Der Vorteil dieser Bauweise wäre gewesen, dass Durchdringungen von Ankern auf ein Minimum reduziert worden wären. Dies wäre durch Reduzierung von Wärmebrücken von deutlichem Vorteil für die Bauphysik und zudem auch für die Fertigung gewesen. Allerdings kommt EPS aufgrund seiner zu geringen Temperaturbeständigkeit nicht im direkten Kontakt mit dem TABSOLAR-Element in Frage. Das Fraunhofer ISE hatte mittels Simulationen als maximale Temperaturen an abgedeckten Fassadenkollektoren mit spektralselektiven Absorbern ca. 178 °C ermittelt. Dies liegt weit über den Maximaltemperaturen von EPS (ca. 80-85 °C). Aufgrund der nicht ausreichenden Temperaturbeständigkeit mussten zahlreiche weitere Dämmstoffe im direkten Verbund mit dem TABSOLAR-Element ausgeschlossen werden (Tabelle 8: Maximaltemperaturen von Dämmstoffen).

Tabelle 8: Maximaltemperaturen von Dämmstoffen (Quelle: FIW München)

Dämmstoff	Maximaltemperatur [°C]
Polystyrol, expandiert (EPS)	80-85
Polystyrol, extrudiert (XPS)	85
Polyurethan (PU)	90
Phenolharz (PF)	150
Baumwolle	100
Flachs und Hanf	100

Holzfaser	110
Kalziumsilikat	k. A.
Kork	110-120
Schafwolle	130-150
Vakuumisolation	k. A.
Zellulose	k. A.

Mineralwolle (Oberbegriff für Glaswolle und Steinwolle) weist hingegen die benötigten Eigenschaften für die Dämmung auf. Die Temperaturbeständigkeit liegt nach Herstellerangaben mit Bindemittel bei 100-200 °C, ohne Bindemittel bei Glaswolle bei 500 °C und bei Steinwolle bei 600-750 °C (Quelle: FIW München). Jedoch ist die Formstabilität geringer als beispielsweise bei EPS. Deswegen muss eine Verbindung zwischen TABSOLAR-Element und tragender Konstruktion mittels Anker geschaffen werden, um beispielsweise ein Abscheren der des TABSOLAR-Elements zu verhindern (Abbildung 91).

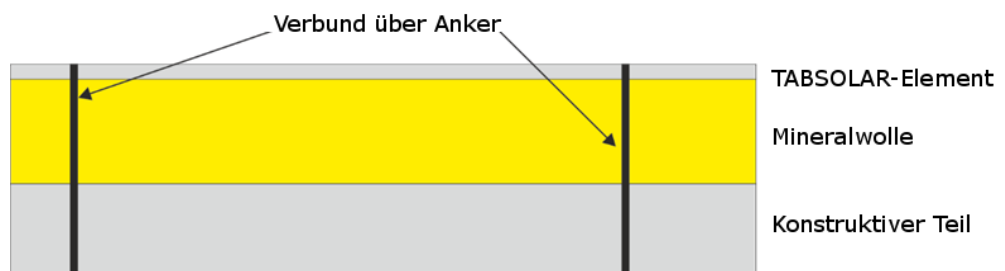


Abbildung 91: Verbund zwischen TABSOLAR-Element und konstruktivem Teil durch Anker

Als Alternative wurde auch ein **Mineralschaum** als Dämmmaterial in Erwägung gezogen (Produkt Geolyth®). Dabei stellte sich heraus, dass die notwendige Stabilität der Wärmedämmung nur mit einer entsprechenden Rohdichte erreicht werden kann, wodurch aber die WLG (Wärmeleitfähigkeitsgruppe) entsprechend verschlechtert wird. Die WLG hätte für die geplante Anwendung bei 0,45 gelegen, und die Stärke des Wandaufbaus hätte sich dementsprechend erhöht. Dies hätte zu erhöhtem Transportaufwand, höherem Gewicht und größerer Zwischenlagerflächen geführt. Die Idee, Mineralschaum im Nassverfahren auf das TABSOLAR-Element aufzutragen und einen Verbund beider Schichten herzustellen, erwies sich leider ebenfalls als nicht möglich. Gemäß Hersteller löst sich der Mineralschaum vom Beton ab. Entsprechend müsste man – wie auch bei der Nutzung von Mineralwolle – Anker vorsehen. Mineralschaum wurde

auch ausgeschlossen, weil die Kosten etwa doppelt so hoch wie bei Mineralwolle wären, um einen geforderten U-Wert zu erreichen.

Schaumglas stellt sich als interessante Alternative dar, die weiter in Betracht gezogen werden sollte. Interessant könnte dabei sein, dass bauphysikalische „Extremfälle“ im Winter und Sommer durch die Eigenschaften des Dämmstoffs eventuell in den Griff zu bekommen sind.

Die derzeit einfachste Lösung stellt eine Konstruktion mit Mineralwolle dar. Jedoch sollte in einem Nachfolgeprojekt die Gesamtkonstruktion der Wand noch intensiver betrachtet werden, um bessere Lösungen zu finden und über neue Materialien wie beispielsweise Schaumglas eine Optimierung in Extremfällen zu erzielen.

2.8.2 Austauschbarkeit

Für die TABSOLAR-Elemente sollte ein austauschbares System entwickelt werden, um Probleme mit der Gewährleistung zu umgehen, falls ein Element innerhalb einer Wand defekt sein sollte. Durch einen modularen Aufbau könnte eine beschädigte Platte ausgetauscht werden, ohne die komplette Wand demontieren zu müssen. Überlegungen gehen dahin, dass bei einer Beschädigung die Glasscheibe sowie das TABSOLAR-Modul von der Wärmedämmung getrennt demontiert und ausgetauscht werden könnte. Die notwendige und gewährrbare Garantiezeit würde in diesem Fall dann bei 5 bis 10 Jahren statt bei 30 Jahren liegen.

2.8.3 Anschlusskonzepte

Der Anschluss üblicher Rohre bzw. Schläuche an TABSOLAR-Elemente mit nicht-kreisförmigen Kanalquerschnitten stellt eine Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts wurden dazu unterschiedliche Anschlusskonzepte für Musterelemente diskutiert. Das in Abbildung 92 links gezeigte Element ist so konstruiert, dass es in den bestehenden UHPC-Kanal eingesteckt und dort z. B. verklebt werden kann. Nachteil dieses Konzepts ist die Querschnittsverengung am Eintritt sowie die Fertigungstoleranzen des Kanalinnenquerschnitts aus UHPC, die von einem Dichtelement oder einem Klebstoff ausgeglichen werden müssten. Es wäre vorstellbar, in einer späteren Ausführung derartige Anschlüsse z. B. mit Dichtelementen aus Elastomeren zu versehen und direkt in den Membran-Vakuumtiefziehprozess zu integrieren, so dass durch Verdrängung des

UHPC keine Querschnittsverengung erfolgen müsste. Die in Abbildung 92 rechts dargestellten Elemente orientieren sich dagegen von vornherein an der Außenkontur des TABSOLAR-Elements, werden also auf den bestehenden Kanal aufgelegt und befestigt. Vorteile dieses Konzepts sind die durch die Tiefziehform sehr genau vorgegebene Außenkontur der Kanäle sowie der gleichbleibende Kanalquerschnitt. Dieses Konzept wurde mittels 3D-Drucken aus einem Polymermaterial umgesetzt. Die so hergestellten Schlauchanschlüsse wurden mit Epoxidharz auf ein TABSOLAR-Element aufgeklebt (Abbildung 93). Für Laboruntersuchungen sind solche Anschlüsse ausreichend, jedoch müssen für Serienprodukte geeignete, langzeitstabile Konzepte noch entwickelt werden. Hierbei sind beispielweise Aspekte wie Temperatur- und Druckbeständigkeit, thermische Ausdehnung, Diffusionsdichtheit oder wirtschaftliche Fertigung zu berücksichtigen.

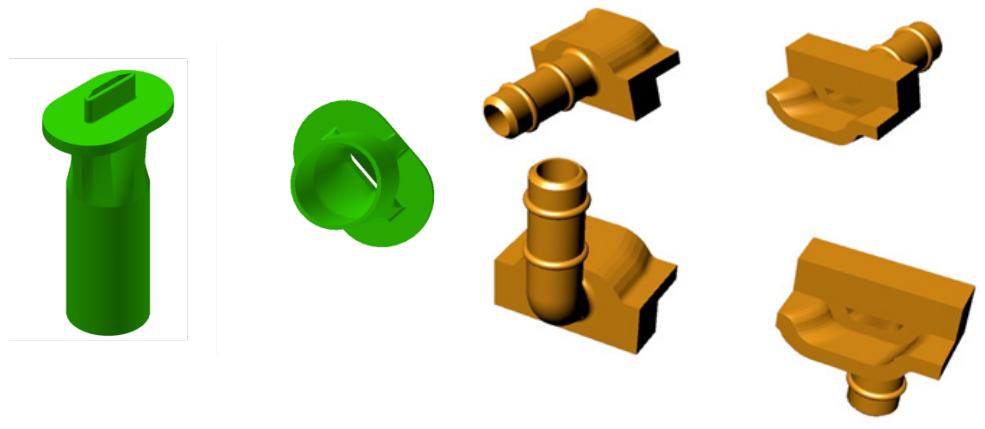


Abbildung 92: 3D-gedruckte mögliche Anschlusskonzepte für TABSOLAR-Musterelemente: Einsteckelement (links), Auflageelemente (rechts)

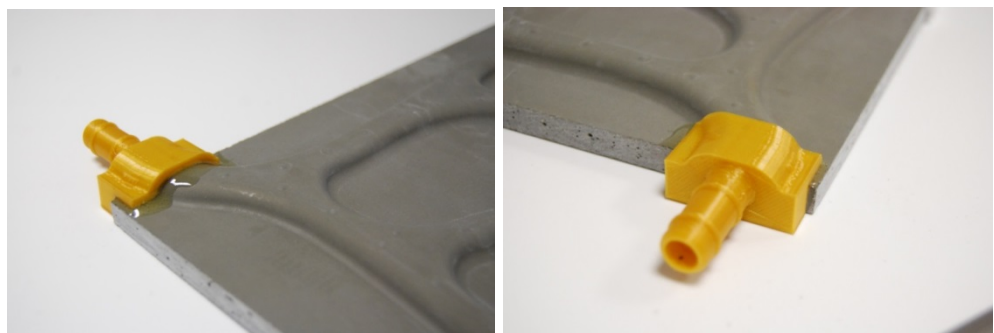


Abbildung 93: Mit Epoxidharz auf TABSOLAR-Element aufgeklebte 3D-gedruckte Schlauchanschlüsse

2.9 Systembetrachtungen

Die Entwicklung thermischer Komponenten muss stets im Systemkontext betrachtet werden. Da die TABSOLAR-Basistechnologie sowohl für thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) als auch für Fassadenkollektoren eingesetzt werden kann, wurden diese beiden Anwendungsfälle separat betrachtet.

2.9.1 Systemkonzepte für TABS

Für die Anwendung von TABSOLAR in thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) wurden vom Fraunhofer ISE mögliche Systemkonzepte betrachtet. Als wesentliche Herausforderungen gegenüber dem Stand der Technik wurden eine Verringerung des Druckverlusts sowie eine Verbesserung der Regelbarkeit identifiziert. Der Stand der Technik weist in der Regel mäander- oder spiralförmige Anordnungen der Rohre auf. Beim TABSOLAR-Konzept sollen jedoch FracTherm®-Strukturen des Fraunhofer ISE zum Einsatz kommen, die zu wesentlich geringeren Druckverlusten führen können. Bezüglich der Regelbarkeit wird angestrebt, die Wärmekapazität durch Minimierung des Materialaufwands – möglich durch die hohe Festigkeit von UHPC und die Strukturoptimierung – so gering wie möglich zu halten und damit eine gute Regelbarkeit zu erhalten. Andererseits kann die Speichermasse dickerer UHPC-Schichten auch gezielt als Kurzzeitspeicher genutzt werden. Daher werden auch Konzepte angedacht, bei denen eine relativ dynamische, gut regelbare Schicht z. B. als Heiz- oder Kühldecke mit einer thermisch getrennten, dahinter liegenden Speicherschicht hoher Wärmekapazität bei Bedarf hydraulisch verschaltet werden kann. TABSOLAR-Konzepte mit geeigneten UHPC-Rezepturen könnten folgende Vorteile aufweisen:

- Vertikale Schichtung von UHPC-Materialien mit günstigen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten
- Geringer Druckverlust durch FracTherm®-Kanalstrukturen
- Verteiler und Sammler im Bauteil (Anschluss an Verteilnetz zu klären)
- Vertikale Schichten getrennt durch Wärmedämmung („Speicherschicht“ und „Übergabeschicht“)
- Vorfertigung der TABS

2.9.2 Systemsimulationen für Fassadenkollektoren

Um eine erste Einschätzung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher TABSOLAR-Fassadenkollektorkonzepte zu erhalten, wurden Systemsimulationen durchge-

führt. Dabei wurden noch keine angepassten Kollektormodelle für Fassaden verwendet, sondern Modelle konventioneller Kollektoren unter einem Neigungswinkel von 45°. An der Rückseite wurde eine 5 cm, an den Seiten eine 2 cm dicke Wärmedämmung aus Mineralwolle angenommen (Wärmeleitfähigkeit: 0,035 W/mK). Der Abstand zwischen Absorber und Glasscheibe betrug in den Simulationen 3 cm, die Aperturfläche 2 m². Für den Absorber wurden die Randbedingungen aus Abschnitt 2.3.2.1 zugrundegelegt. Es wurden zahlreiche Varianten simuliert, die in drei potenzielle Produktfamilien eingeteilt werden können (Tabelle 9). Die erste Familie orientiert sich am Stand der Technik, weist also Absorber mit spektralselektiver oder nichtselektiver Beschichtung auf und ist mit einer Glasscheibe abgedeckt. Bei der Beschichtung wurden unterschiedliche Optionen mit ihren Absorptions- und Emissionsgraden berücksichtigt, die in den Abschnitten 2.6 und 2.7 beschrieben wurden. Für die Scheibe wurde ein Weißglas ohne Antireflexbeschichtung angenommen. Das Konzept der zweiten Produktfamilie besteht darin, auf die spektralselektive Beschichtung des Absorbers zu verzichten, dafür jedoch die Glasscheibe mit einer Low-E-Beschichtung auf Position 2 zu versehen. Zu Vergleichszwecken wurde auch eine Variante mit spektralselektiver Schicht auf Druckerpapier aufgenommen. Die dritte Familie wiederum verzichtet gänzlich auf die Verglasung, was sich zwangsläufig auf das erreichbare Temperaturniveau und den Ertrag auswirkt (Anwendung z. B. für die Schwimmbadbeheizung oder als Niedertemperaturquelle für eine Wärmepumpe). Allerdings können bei einer solchen Variante die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten von UHPC sehr gut architektonisch genutzt werden.

Tabelle 9: Absorptions- und Emissionsgrade von Absorber bzw. Glasscheibe der simulierten TABSOLAR-Varianten

		Absorber		Scheibe	
		α	$\epsilon_{100\text{ °C}}$	τ	$\epsilon_{100\text{ °C}}$
unbeschichtete Scheibe	Nextel-Lack (schwarzer Lack)	0,96	0,98	0,91	0,92
	spektralsel. Schicht	0,96	0,11	0,91	0,92
	spektralsel. Schicht auf Backpapier	0,95	0,13	0,91	0,92
	spektralsel. Schicht auf Druckerpapier	0,95	0,32	0,91	0,92
	Transfer-Electric-Solarlack	0,95	0,88	0,91	0,92
	spektralsel. Schicht, nicht haftfest	0,94	0,07	0,91	0,92
	durchgefärbter Beton "anthrazit"	0,89	0,95	0,91	0,92
	spektralsel., bunt	0,80	0,07	0,91	0,92
	durchgefärbter Beton "grün"	0,67	0,95	0,91	0,92
Low-E-Scheibe	Nextel-Lack (schwarzer Lack)	0,96	0,98	0,85	0,18
	spektralsel. Schicht auf Druckerpapier	0,95	0,32	0,85	0,18
	Transfer-Electric-Solarlack	0,95	0,88	0,85	0,18
	durchgefärbter Beton "anthrazit"	0,89	0,95	0,85	0,18
	durchgefärbter Beton "grün"	0,67	0,95	0,85	0,18
keine Scheibe	Nextel-Lack (schwarzer Lack)	0,96	0,98	1,00	1,00
	spektralsel. Schicht	0,96	0,11	1,00	1,00
	spektralsel. Schicht auf Backpapier	0,95	0,13	1,00	1,00
	spektralsel. Schicht auf Druckerpapier	0,95	0,32	1,00	1,00
	Transfer-Electric-Solarlack	0,95	0,88	1,00	1,00
	spektralsel. Schicht, nicht haftfest	0,94	0,07	1,00	1,00
	durchgefärbter Beton "anthrazit"	0,89	0,95	1,00	1,00

Auf Basis des oben beschriebenen Kollektormodells und der angenommenen Daten für die Absorptions- und Emissionsgrade konnten für die unterschiedlichen Varianten Wirkungsgradkennlinien ermittelt werden (Abbildung 94 bis Abbildung 96). Deutlich zu erkennen ist der steilere Kennlinienverlauf bei nichtselektiven Schichten, der insgesamt niedrigere Wirkungsgrad farbiger Schichten sowie der wesentlich steilere Kennlinienverlauf bei ungedeckten Kollektoren.

Mit den ermittelten Wirkungsgradkennlinien wurde ein klassisches Solarkombisystem zur Bereitstellung von Heizwärme und zur Trinkwarmwasserbereitung simuliert (Einfamilienhaus, Heizbedarf: 60 kWh/(m²a), Standort: Würzburg). Die Kollektorfläche wurde variiert (10, 15 und 20 m²) und mit einem Neigungswinkel von 90° (Fassade) berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass die unter einem Neigungswinkel von 45° berechneten Wirkungsgradkennlinien verwendet wurden. Zum Vergleich wurde auch ein Referenzsystem mit marktverfügbaren Kollektoren (Wagner EURO L22 AR) simuliert. Dieser Kollektor weist neben einem typischen spektralselektiven Absorber auch eine Antireflexverglasung auf. Die Möglichkeit einer Antireflexbeschichtung, die prinzipiell auch für TABSOLAR-Systeme existiert, wurde bei deren Simulationen noch nicht berücksichtigt, d. h. auch die Erträge der TABSOLAR-Systeme könnten noch höher ausfallen. Abbildung 97 zeigt die für das beispielhafte Solarkombisystem berechneten solaren Deckungsraten als Ergebnis der Simulationsstudie. Wie bereits bei den Wirkungsgradkennlinien wird deutlich, dass nichtselektive und farbige Schichten zu geringeren Deckungsraten führen und insbesondere ungedeckte Solarabsorber zu deutlich geringeren Deckungsraten als beim Referenzsystem führen. Dabei ist zu beachten, dass man ungedeckte Kollektoren sinnvollerweise auch nicht in einem klassischen Solarkombisystem, sondern in einem reinen Trinkwarmwasser-, Schwimmbadheizungs- oder Wärmepumpensystem einsetzen würde. Es wird auch deutlich, dass die potenzielle Produktfamilie mit Low-E-Verglasung ohne spektralselektive Beschichtung erwartungsgemäß zwar schlechter abschneidet als die Familie mit spektralselektiver Beschichtung, jedoch liegen die solaren Deckungsraten lediglich ca. 8 % niedriger, so dass diese Variante durchaus auch attraktiv sein kann, wenn sie gegebenenfalls deutliche Vorteile wie geringere Kosten oder bessere Austauschbarkeit mit sich bringt.

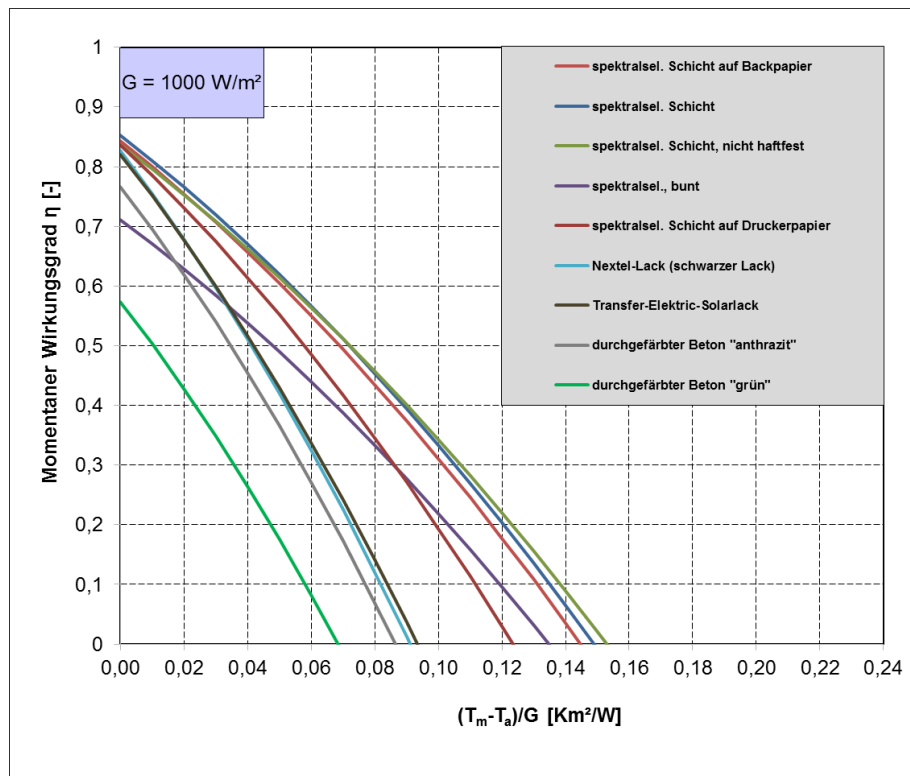


Abbildung 94: Wirkungsgradkennlinien abgedeckter TABSOLAR-Kollektoren mit unbeschichteter Glasscheibe

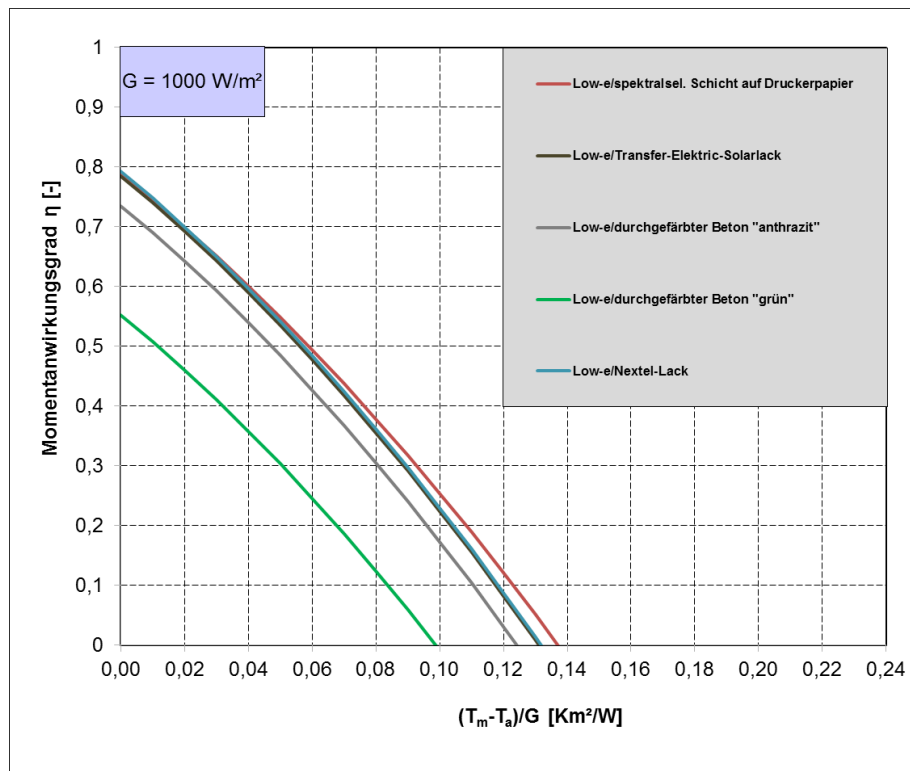


Abbildung 95: Wirkungsgradkennlinien abgedeckter TABSOLAR-Kollektoren mit Glasscheibe mit Low-E-Beschichtung auf Position 2

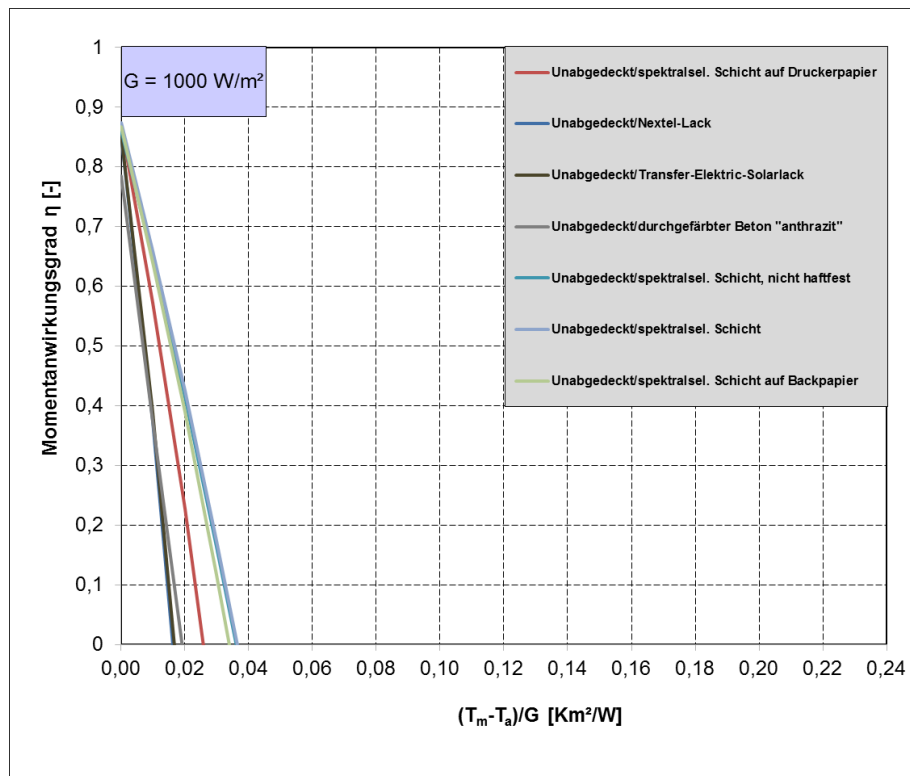


Abbildung 96: Wirkungsgradkennlinien unabgedeckter TABSOLAR-Kollektoren

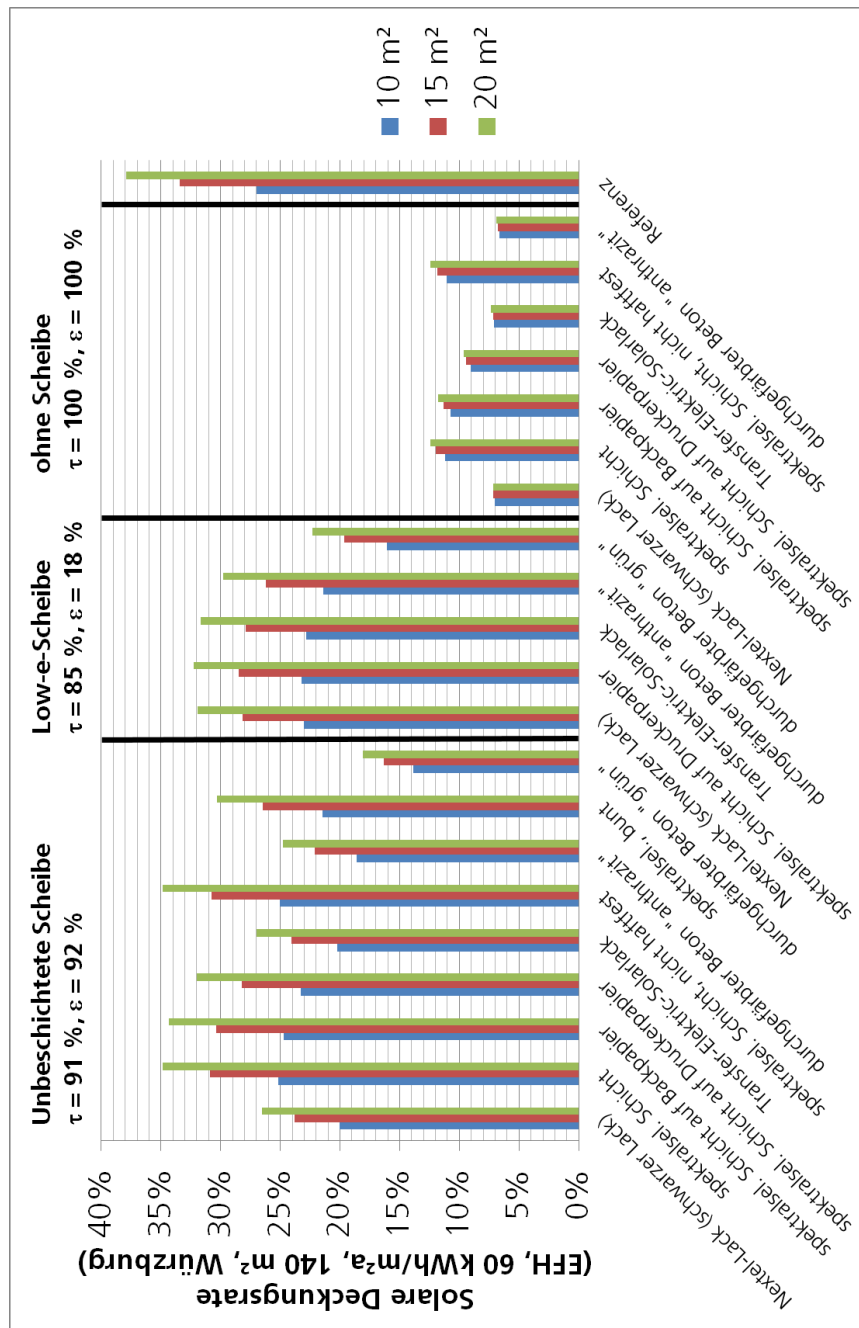


Abbildung 97: Solare Deckungsraten der simulierten TABSOLAR-Varianten und des Referenzsystems

2.9.3 Ökobilanz/Life-Cycle-Analysis (LCA)

Um den ökologischen Einfluss der TABSOLAR-Kollektoren zu evaluieren und als zusätzliche Entwicklungshilfe nutzen zu können, wurden Vorarbeiten zu einer umfassenden Ökobilanz durchgeführt. Als funktionale Einheit wurde ein Wand-aufbau mit einer Höhe von 5 m, einer Breite von 3 m und einem Gesamtener-giedurchlassgrad von $U = 0,234 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gewählt. Die Fassade soll einer Druck-

last von 6,8 MN standhalten. Sowohl der Gesamtenergiedurchlassgrad als auch die Drucklast wurden durch das Referenzsystem bestimmt. Durch ein Solarsystem an der Fassade sollen 23,8 % des Gesamtwärmebedarfs eines Einfamilienhauses mit einer Grundfläche von 140 m² in Freiburg gedeckt werden.

Es wurden zwei verschiedene TABSOLAR-Kollektoren mit einem Referenzsystem verglichen. Die genauen Wandaufbauten sind Abbildung 98 zu entnehmen.

Das gewählte Referenzsystem besteht aus einer Sandwich-Wand mit EPS-Isolierung aus der Produktpalette von Firma Spürgin mit einem Standard-Solarkollektor. Für Fallstudie I von den TABSOLAR-Kollektoren wurde die gleiche Innenwand wie im Referenzsystem, ein zweischaliger Dämmbau aus EPS und Steinwolle, der den höheren Temperaturen direkt am UHPC-Modul standhält, ein durchströmbares UHPC-Modul mit einer schwarzen Farbe und eine Glasabdeckung gewählt. In diesem Fall bedeckt der TABSOLAR-Kollektor die gesamte Wand. Die Fallstudie II besteht aus zwei Teilen: Im oberen Teil ist der Wandaufbau identisch mit dem in Fallstudie I, nur ist das UHPC-Modul nun spektralselektiv beschichtet und erzielt somit deutlich höhere Erträge. Der untere Teil ist identisch mit dem Referenzsystem.

Zur Bestimmung der solaraktiven Flächen mussten Jahres-Simulationen durchgeführt werden. Dafür wurden zunächst die Wirkungsgradkennlinien der TABSOLAR-Kollektoren unter Annahme der im Projekt gemessenen Absorptions- und Emissionsgrade und der durch Simulation bestimmten Kapazität mit Hilfe eines Knotenmodells in Modelica bestimmt. Diese Wirkungsgradkennlinien dienten als Input für Jahressimulationen in TRNSYS. Es wurde ein Kombisystem eines Einfamilienhauses in Freiburg simuliert. Für den Kollektor mit der geringsten Leistungsfähigkeit (Fallstudie I, schwarze Farbe) wurde die gesamte Wandfläche zur Verfügung gestellt, also 15 m². Die so erzielte solare Deckungsrate diente als Referenz zur Bestimmung der anderen Flächen, die so variiert wurden, dass die gleiche solare Deckungsrate (23,8 %) erzielt wurde.

Für die Bestandsaufnahme aller Eingabedaten wurde eine Primärdatensammlung bei den Projektpartnern Spürgin und G.tecz sowie an der Sputteranlage des Fraunhofer ISE durchgeführt.

Diese Daten wurde soweit wie möglich in eine studentische Version der Ökobilanz-Software Gabi mit beschränktem Zugriff auf Daten übertragen und alle Prozesse zu den Lebenszyklusphasen Materialgewinnung und Herstellung mo-

delliert. Ein Recyclingszenario wurde in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Für die Installationsphase waren nicht ausreichend Daten vorhanden. Innerhalb der Nutzungsphase wurde lediglich die produzierte Energie bilanziert, andere Arbeiten wie z. B. Wartung wurden nicht betrachtet. Als Lebensdauer wurde für alle Fallstudien 25 Jahre angenommen.

Im Ergebnis waren die TABSOLAR-Fallstudien in sämtlichen Kategorien der betrachteten Umwelteinflüsse dem Referenzsystem überlegen. Das liegt zum großen Teil an dem geringeren Einsatz von EPS und dem geringeren Materialeinsatz bei der Fassadenschale, die anstelle von 8 cm stahlverstärktem C30/37 nun aus 2 cm UHPC besteht (vgl. Abbildung 99). Innerhalb der beiden Fallstudien hatte Fallstudie I den geringeren Umwelteinfluss. Das liegt neben den schon für das Referenzsystem genannten Gründen an den Umwelteinflüssen des Trocknungsprozesses, der als Vorbehandlung vor dem Sputtern der UHPC-Proben vorgenommen wurde und hochgerechnet wurde. Dieser sollte, wenn möglich, effizienter gestaltet werden.

Diese Arbeiten dienten als Vorarbeit zu einer ausführlicheren Lebenszyklusanalyse in einem geplanten Nachfolgeprojekt.

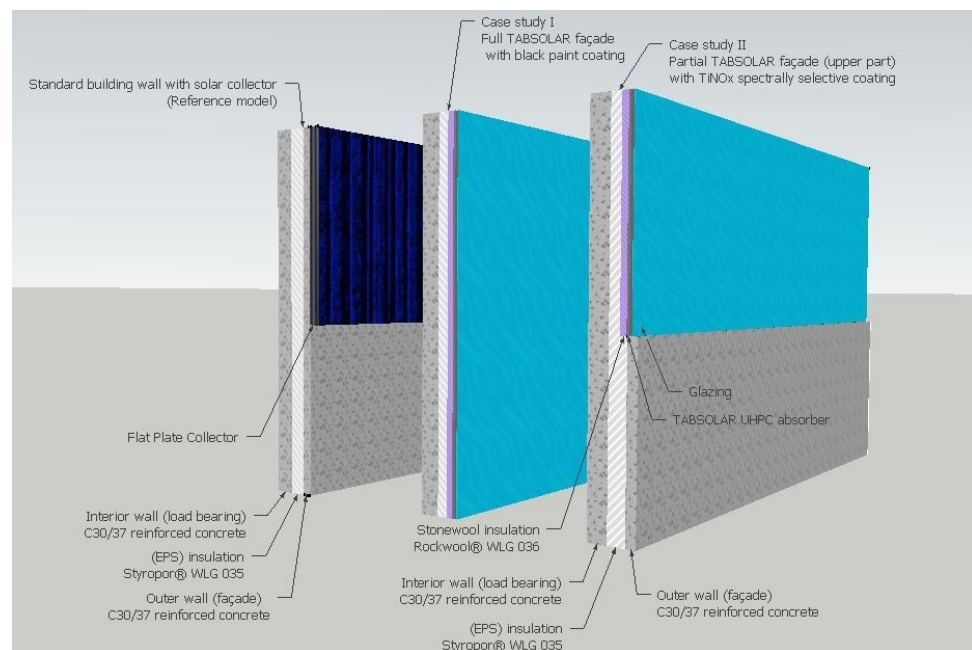


Abbildung 98: Drei verschiedene Wandaufbauten, die mittels Ökobilanz miteinander verglichen wurden.

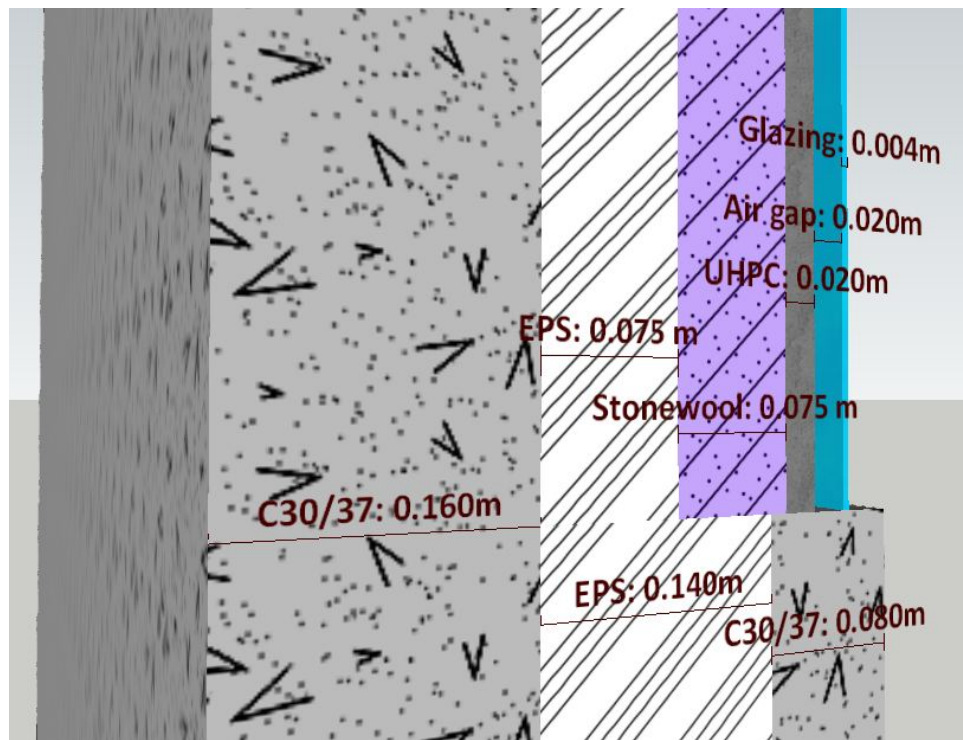


Abbildung 99: Detailansicht aus Fallstudie II

2.10 Versuche und Messungen

Nach erfolgreicher Fertigung sollten die TABSOLAR-Elemente hinsichtlich ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit untersucht werden. Dazu wurden Versuche und Messungen durchgeführt.

2.10.1 Durchströmungsversuche mit Thermografieaufnahmen

Die gleichmäßige Durchströmung der TABSOLAR-Elemente ist eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe thermische Effizienz. Um sie qualitativ zu untersuchen, wurden TABSOLAR-Elemente am Fraunhofer ISE zunächst auf 20 °C temperiert und anschließend mit 50 °C warmen Wasser mit einem Volumenstrom vom 20 l/h durchströmt. Die Oberfläche (glatte Seite) wurde dabei mit einer Thermografiekamera beobachtet. Abbildung 100 zeigt beispielhaft eine Aufnahme aus mehreren aufgenommenen Thermografiesequenzen. Dabei wird deutlich, dass das Element insgesamt sehr gleichmäßig aufgeheizt wird und die Durchströmung demnach ebenfalls sehr gleichmäßig ist, allerdings wird ein Teilkanal (ganz links, obere Hälfte) offenbar nicht durchströmt. Auch bei Fa. Zehnder wurden entsprechende Versuche an vier TABSOLAR-Elementen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass einzelne Bereiche von TABSOLAR-Elementen offenbar nicht oder nur schlecht durchströmt werden (Abbildung 101). Aufgrund

der binären Verzweigungen von FracTherm®-Strukturen kann schon eine einzelne Verengung zu einer Fehldurchströmung in einem größeren Bereich führen. Die Versuche wurden am Fraunhofer ISE wiederholt, und es zeigten sich die gleichen Erscheinungen. Später wurden die betreffenden Elemente von Fa. G.tecz aufgesägt, und es zeigte sich, dass einzelne Kanäle teilweise mit Beton zugesetzt waren. Somit handelte es sich also nicht um ein grundsätzliches Problem der Kanalstruktur, sondern um Fehler, die bei der Fertigung entstanden waren. Da diese Fehler nicht bei allen Elementen in gleichem Maße aufgetreten waren, kann angenommen werden, dass sie bei Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit auch dauerhaft vermieden werden können. Um dies zu erreichen, ist neben zahlreichen weiteren Versuchen eine hohe Reproduzierbarkeit bei der UHPC-Herstellung und bei der Fertigung erforderlich. So sollten zum Beispiel die äußeren Randbedingungen wie Temperatur und Feuchte sowie der zeitliche Ablauf (z. B. Zeit zwischen Abziehen des Betons und Zusammenfügen von Ober- und Unterteil) möglichst konstant gehalten werden.

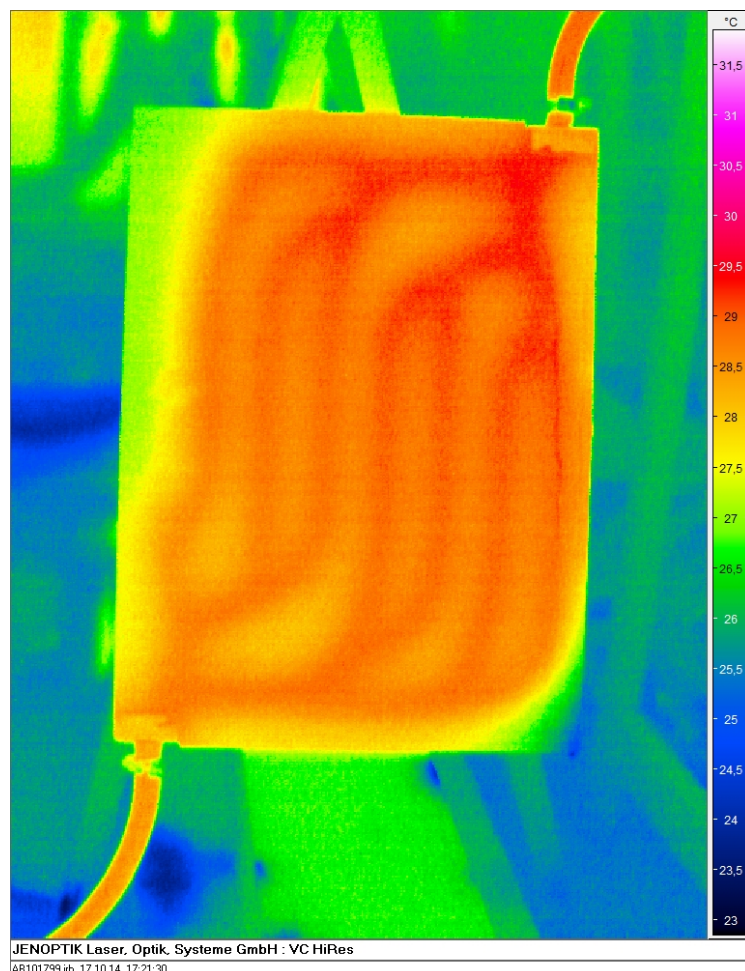


Abbildung 100: Thermografieaufnahme eines Durchströmungsversuchs von einem TABSOLAR-Element (Fraunhofer ISE)

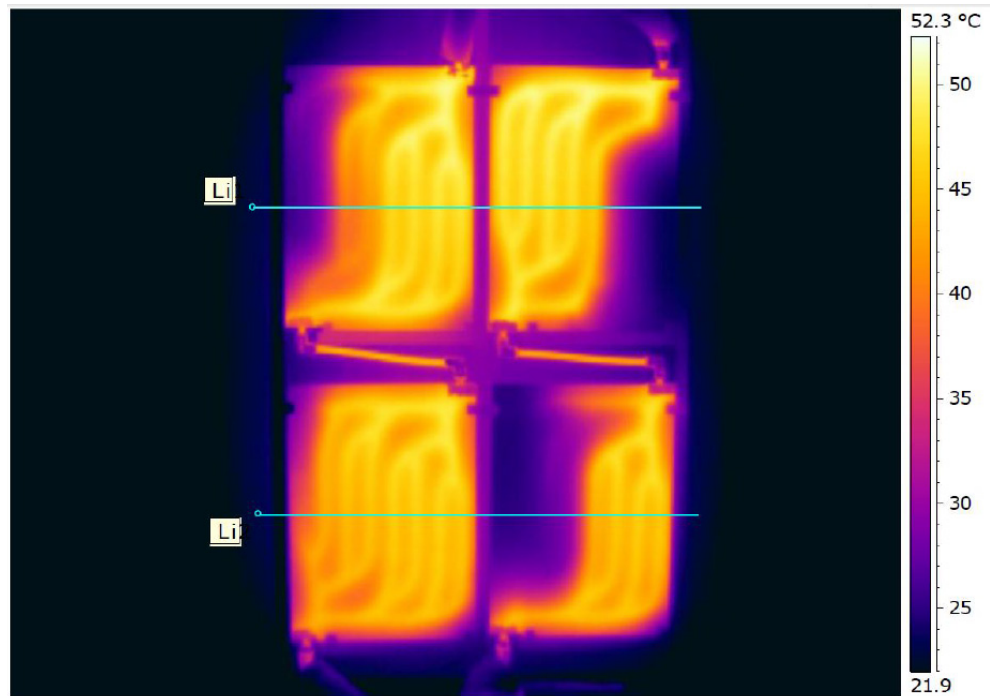


Abbildung 101: Thermografieaufnahmen eines Durchströmungsversuchs von vier parallel/seriell verschalteten TABSOLAR-Elementen (Fa. Zehnder)

2.10.2 Leistungsmessungen am Heizkörpererteststand

Abgesehen von der generellen Herstellbarkeit durchströmbarer Elemente aus UHPC bestand ein Hauptziel des Projekts darin, eine thermische Effizienz zu erreichen, die mit jener von Kollektoren bzw. Heiz- oder Kühlelementen nach dem Stand der Technik vergleichbar ist. Um diese zu bestimmen, wurden an einem Heizkörpererteststand von Fa. Zehnder vier TABSOLAR-Elemente (jeweils 332 mm x 450 mm) hinsichtlich ihrer thermischen Leistung nach EN 442 vermessen. Es waren vier Elemente notwendig, weil die Fläche eines einzelnen Elements zu gering gewesen wäre. Jeweils zwei Elemente wurden in Reihe geschaltet und diese wiederum parallel. Zunächst war geplant, die 3D-gedruckten Kunststoffanschlüsse zu verwenden, jedoch erwiesen sich diese als nicht ausreichend temperaturstabil (Abbildung 102). Sie wurden daher durch Stahlan-schlüsse ersetzt, die mit Epoxidharz eingeklebt wurden. Abbildung 103 zeigt die wärmedämmten Rohrleitungen sowie die neuen Stahlan-schlüsse. Mit dem vorbereiteten Versuchsaufbau (Abbildung 104) konnten folgende Daten ermittelt werden:

$$\Phi' = K_m \Delta T^{n'}$$

mit $K_m = 4,25$
 und $n' = 1,19$

Leistung bei $\Delta T = 50 \text{ K}$: Φ_{50} = **454 W**

Leistung bei $\Delta T = 30 \text{ K}$: Φ_{30} = **247 W**

Abbildung 105 zeigt die zugehörige Leistungskennlinie. Da einige Bereiche schlecht durchströmt waren (siehe Abschnitt 2.10.1), war die Leistung bezogen auf die Gesamtfläche relativ gering (454 W bzw. 760 W/m² bei $\Delta T = 50 \text{ K}$). Berücksichtigt man jedoch, dass die effektive Fläche aufgrund dieser Fehldurchströmung nur ca. drei Viertel der Gesamtfläche war und bezieht die Leistung darauf, erhält man eine flächenspezifische Leistung von 1013 W/m². Dies liegt im Bereich typischer wasserdurchströmter Heizkörper von Zehnder (ca. 1000 W/m²). Es kann also erwartet werden, dass TABSOLAR-Elemente als Heizelemente ein Leistungsniveau marktüblicher Heizkörper erreichen können, sofern eine gleichmäßige und vollständige Durchströmung gewährleistet ist.

Ursprünglich war auch eine Leistungsmessung als Solarkollektor geplant. Aufgrund der ungleichmäßigen Durchströmung einiger Elemente machte dies jedoch keinen Sinn. Allerdings kann erwartet werden, dass auch bei dieser Anwendung die Effizienz entsprechend hoch ist, weil die Wärmeübertragungsvorgänge gleich sind, auch wenn die Richtung des Wärmestroms in diesem Fall umgedreht ist.

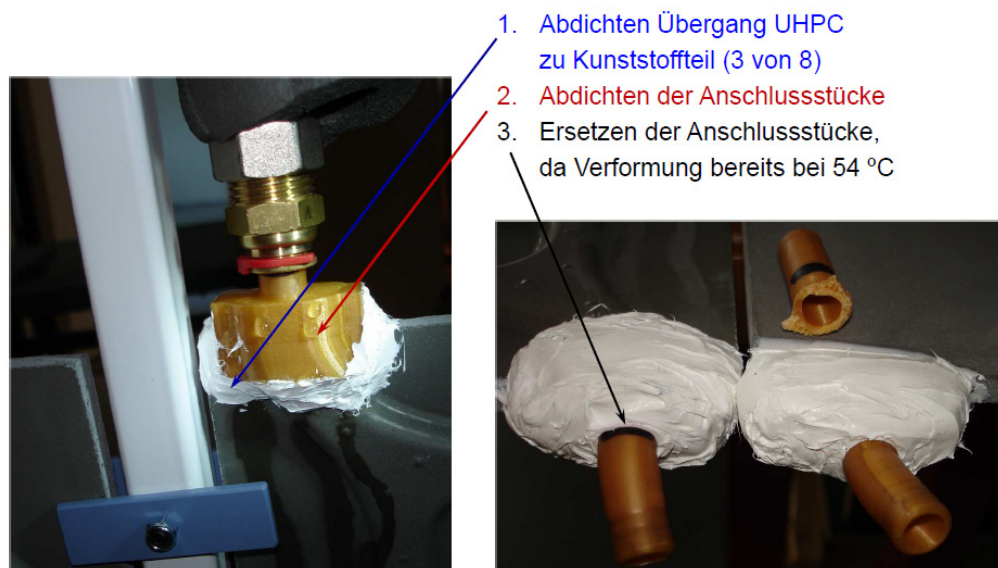


Abbildung 102: Vorbereitung der ursprünglichen Anschlüsse (links) und Verformung (rechts)

Messstelle für Vorlauftemperatur



Stahlprofil hart gelötet mit
2 Komponenten Epoxyharz eingeklebt



Abbildung 103: Wärmedämmung der Rohrleitungen (links) und Ersatzanschluss aus Stahl (rechts)



Abbildung 104: Versuchsaufbau zur Leistungsmessung der vier TABSOLAR-Elemente

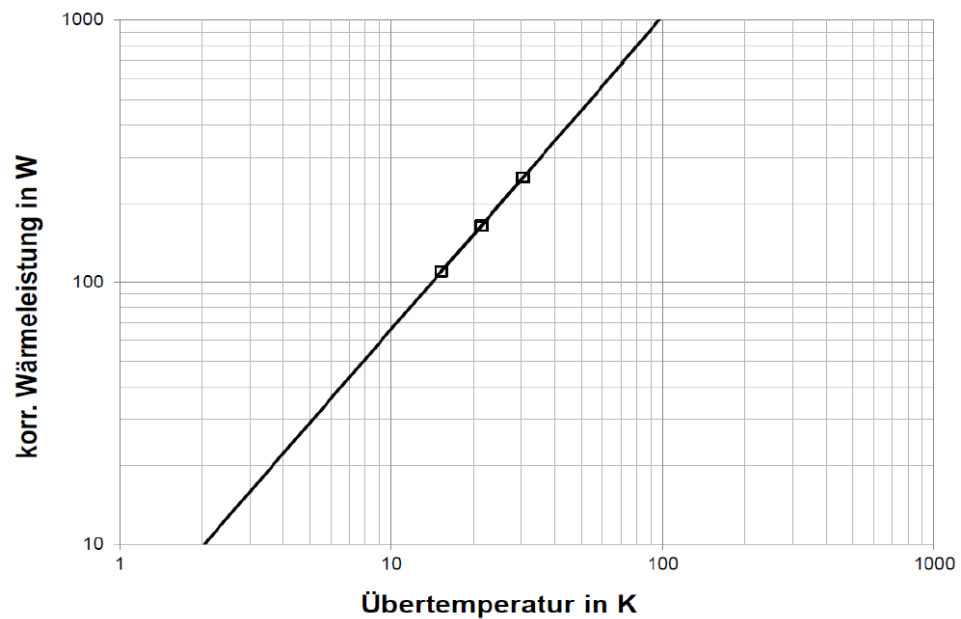


Abbildung 105: Heizkörper-Leistungskennlinie der vier TABSOLAR-Elemente

2.11 Verwendung der Fördermittel

Die Fördermittel wurden wie geplant für die Entwicklung und Bewertung der TABSOLAR-Basistechnologie zur Herstellung durchströmbarer Bauteile aus UHPC verwendet. Neben den Personalkosten wurden damit insbesondere auch Ausgaben für diverse Versuche (Werkzeugherstellung, Vakuumpumpe, Materialien, Schalungen, Wärmedämmungen, ...) und Aufwendungen für die Beschichtungstechnologie sowie für Unteraufträge gedeckt. Darüber hinaus entstanden wie geplant Reisekosten.

2.12 Verwertung

Die Projektergebnisse sollen seitens der Projektpartner genutzt werden, um weiter an dem TABSOLAR-Konzept zu arbeiten. Dazu wurde ein Folgeprojekt „TABSOLAR II“ beim BMWi beantragt, das im Sommer 2015 beginnen soll. Ziel des Folgeprojekts ist im Wesentlichen, neu aufgeworfene Fragestellungen zu beantworten und zuverlässige TABSOLAR-Konzepte zu entwickeln. Das Konsortium in TABSOLAR II wird sich gegenüber TABSOLAR teilweise ändern. Zur Nutzung vorhandener Patente, zur Wahrung des erarbeiteten Know-hows und eventueller Unterlizenzierung werden die Projektpartner geeignete Vereinbarungen treffen.

2.13 Öffentlichkeitsarbeit und Vermarktung

Die Vorstellung der Projektergebnisse in der Öffentlichkeit stellt eine wichtige Aufgabe dar, zumal das Projektkonsortium hierdurch wichtige Impulse seitens anderer Forscher, Firmen oder potenzieller Kunden erhalten kann. Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse der Öffentlichkeit auf unterschiedliche Weise zugänglich gemacht.

2.13.1 Veröffentlichungen und Messeexponat

Im Rahmen des Projekts entstanden folgende Veröffentlichungen:

- **Tagungen**

- L. Koch, M. Hermann, M. Bauch, "Investigation of new integrated solar thermal absorbers by means of a 2-D model" in *EuroSun 2012*, 18.-20.9.2012, Rijeka, Kroatien, 2012.
- L. Koch, M. Hermann, „Bewertung multifunktionaler Kollektoren unter Nachhaltigkeitsaspekten" in *Innovationsforum der 3. Solarthermie-Technologiekonferenz*, 30./31. Januar 2013, Berlin, 2013.
- M. Hermann, L. Koch, P. Di Lauro, C. Hildebrandt, C. Jerg, „TABSOLAR – Solarabsorber und andere thermisch aktive Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)" in *23. OTTI-Symposium "Thermische Solarenergie"*, 24.-26. April 2013, Bad Staffelstein, 2013.
- M. Hermann, S. Spürgin, F. A. Roell, T. Sablotny, I. Tesari, G. Sexauer, „TABSOLAR – Solarabsorber und andere thermische aktive Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)" in *EnOB-Symposium 2014*, 20.-21. März 2014, Essen, 2014.
- M. Hermann, P. Di Lauro, F. Kennemann, L. Koch, T. Teichmann, T. Sablotny, „TABSOLAR – Materialentwicklung und Fertigung durchströmter Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)" in *24. OTTI-Symposium "Thermische Solarenergie"*, 7.-9. Mai 2014, Bad Staffelstein, 2014.

- **ISE-Jahresbericht 2013/14**

- P. Di Lauro, **M. Hermann**, C. Jerg, D. Kalz, A. Katsifaraki, F. Kennemann, L. Koch, E. Laurenz, C. Maurer, L. Schnabel, D. Wystrcil, W. Platzer, „Thermoaktive Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)“, Jahresbericht 2013/14, Fraunhofer ISE, 2014.

- **Internet**

- Projektwebsite: www.tabsolar.de
- EnOB-Website: www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/thermoaktive-bauteile-aus-uhpc-beton/

- **BAU-Messe 2015**

- Auf der BAU 2015 wurde ein TABSOLAR-Exponat ausgestellt. Das ursprünglich für die Messe hergestellte Exponat mit Reliefstrukturen (Logos der Projektpartner) und spektralselektiver Beschichtung (Abbildung 49) war leider beim Transport zu Bruch gegangen. Daher wurde ein anderes TABSOLAR-Element gemeinsam mit Fotos des ursprünglichen Exponats sowie einem spektralselektiv beschichteten UHPC-Muster ausgestellt (Abbildung 106).



Abbildung 106: Exponat auf der BAU 2015

2.13.2 Produktperspektiven

Beim letzten Projekttreffen wurde vom Konsortium im Rahmen eines kurzen Brainstormings eine erste Mindmap erstellt, um Produktperspektiven für das TABSOLAR-Konzept aufzuzeigen. Dabei zeigten sich bereits zahlreiche mögliche Anwendungen und Märkte, die teilweise weit über die Kernanwendungen von TABSOLAR – Fassadenkollektoren bzw. TABS – hinausgehen. Aus Vertraulichkeitsgründen wird die Mindmap hier nicht gezeigt.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptziel des Projekts TABSOLAR bestand darin, durchströmbare Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) für verschiedene Anwendungen – Fassadenkollektoren oder thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) – zu entwickeln, zu fertigen und zu bewerten. Es sollten zwei unterschiedliche Fertigungsmöglichkeiten auf ihre Eignung untersucht werden: das vom Fraunhofer ISE entwickelte Membran-Vakuumentiefziehverfahren und das Umgießen von 3D-Textilstrukturen mit Beton.

Es wurden einige grundlegende Materialuntersuchungen und UHPC-entwicklungen durchgeführt. Diese betrafen beispielweise die Beständigkeit von UHPC gegenüber Temperaturschocks, die Haftfestigkeit spektralselektiver Beschichtungen auf UHPC, den Verbund von UHPC und Textilien sowie die Entwicklung von UHPC mit geeigneten rheologischen Eigenschaften für die Durchführung des Membran-Vakuumentiefziehverfahrens. Darüber hinaus wurde UHPC versuchsweise mit Epoxidharz bzw. Wasserglas beschichtet. Eine Auskleidung der Kanäle mit Epoxidharz hatte zum Ziel, einerseits die Querschnitte auszurunden und damit die Innendruckstabilität zu erhöhen, andererseits konnte so die Wasserdampfdiffusion aus den Kanälen reduziert werden. Alternativ wurde Wasserglas für die Auskleidung oder auch als Substrat für die spektralselektive Beschichtung in Erwägung gezogen, jedoch sind hier weitere Untersuchungen notwendig, weil die Temperaturstabilität der verwendeten Wassergläser noch nicht ausreichend war. Um das thermische Verhalten von TABSOLAR-Elementen voraussagen zu können, wurden die thermischen Eigenschaften (spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit) sowie die Dichte von UHPC im Labor bestimmt. Außerdem wurde die Dampfdiffusion durch unterschiedliche UHPC- und Referenzproben aus Epoxidharz gemessen.

Um die Kanalquerschnitte im Hinblick auf die notwendige Innendruckstabilität auslegen zu können, wurden strukturmechanische Simulationen durchgeführt. Des Weiteren wurde eine bionische Optimierung einer abgehängten, für akustische Zwecke strukturierten Decke durchgeführt.

Für die Auslegung der Fluidkanäle wurden bionische FracTherm[®]-Strukturen gewählt. In einem iterativen Prozess, bei dem strukturmechanische und thermische Simulationen (Bestimmung des Kollektorwirkungsfaktors F') durchge-

führt wurden, wurden schließlich die Kanalquerschnitte und die Kanalgeometrie festgelegt. Darüber hinaus wurde ein thermisches Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk (RC-Netzwerk) als Knotenmodell für die vereinfachte Simulation von TABSOLAR-Elementen erstellt.

Das Membran-Vakuumtiefziehverfahren konnte erfolgreich zur Herstellung durchströmbarer Bauteile aus UHPC eingesetzt werden. Dazu war zunächst ein Werkzeug konstruiert und gefertigt sowie eine geeignete FracTherm®-Struktur erstellt worden. Es wurden auch TABSOLAR-Muster mit Reliefstrukturen und spektralselektiven Schichten hergestellt.

Das Umgießen von 3D-Textilien erwies sich als deutlich aufwendiger. Zunächst waren Textilien mit FracTherm®-Strukturen gefertigt worden. Die ursprüngliche Idee, die Kanäle mit Luft aufzuweiten, erwies sich als nicht machbar, weil Gewebe bzw. Gestricke nicht luftdicht sind. Die Kanalstrukturen konnten zwar mit anderen Materialien befüllt und anschließend mit Beton umgossen werden, jedoch erscheint dieses Verfahren für die Praxis zu aufwendig und wurde daher nicht weiterverfolgt.

Um eine hohe thermische Effizienz zu erreichen, weisen Solarabsorber nach dem Stand der Technik spektralselektive Beschichtungen auf. Daher wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche Untersuchungen zur spektralselektiven Beschichtung auf UHPC durchgeführt. Es konnten gute Werte für die Absorptions- und Emissionsgrade erreicht werden, allerdings zeigte sich, dass die Haftung eine große Herausforderung darstellen kann und die thermische Vorbehandlung der UHPC-Elemente eine wichtige Rolle spielt. Es wurden daher auch UHPC-Textil-Halbzeuge beschichtet. Dabei besteht die Idee darin, dünne UHPC-Platten herzustellen, die beschichtet werden können und anschließend bei der Fertigung von TABSOLAR-Elementen von einer weiteren UHPC-Schicht übergossen werden können. Das Textil dient dabei der Verbindung zwischen Halbzeug und TABSOLAR-Element. Darüber hinaus wurden auch weitere Substrate spektralselektiv beschichtet. Auch nichtselektive Lacke und durchgefärbte UHPC-Proben wurden hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften vermessen.

Bei der Nutzung von TABSOLAR-Elementen an Fassaden kommt dem Feuchtehaushalt eine wichtige Bedeutung zu. Daher wurden hygrothermische Simulationen eines beispielhaften Wandaufbaus durchgeführt. Bei der Wahl der Wärmedämmung muss berücksichtigt werden, dass im Stagnationsfall hohe Absorbertemperaturen entstehen können. Es wurden daher unterschiedliche Wärme-

dämmkonzepte betrachtet und bewertet. Außerdem gab es Überlegungen zu modularen Konzepten, um eine Austauschbarkeit der Elemente zu ermöglichen.

Um TABSOLAR-Musterelemente hydraulisch anschließen zu können, wurden Adapter mittels 3D-Drucken hergestellt. Diese erwiesen sich allerdings mit dem gewählten Kunststoff als nicht temperaturstabil.

TABSOLAR-Elemente können in unterschiedlichen Systemen als thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) oder Fassadenkollektoren eingesetzt werden. Im Rahmen des Projekts wurden mögliche Vorteile für entsprechende TABS aufgezeigt. Für die solarthermische Anwendung wurden Systemsimulationen mit unterschiedlichen TABSOLAR-Varianten durchgeführt. Dabei wurden die erreichbaren solaren Deckungsraten für ein beispielhaftes Kombisystem ermittelt. Darüber hinaus wurden erste Untersuchungen zur Ökobilanz bzw. Life-Cycle-Analysis (LCA) von TABSOLAR-Elementen durchgeführt.

Schließlich wurden mit den erstellten TABSOLAR-Mustern Versuche und Messungen durchgeführt. Thermografieaufnahmen zeigten bei der Durchströmung mit warmem Wasser eine prinzipiell gute Aufheizung, allerdings wurden einzelne Kanäle bei manchen Elementen nicht bzw. schlecht durchströmt. Es wurde später festgestellt, dass diese Kanäle teilweise von UHPC verschlossen waren. Messungen an einem Heizkörperstand verdeutlichten, dass Leistungen im Bereich üblicher Heizkörper erreicht werden können, sofern die Prozesssicherheit zur Herstellung von Kanälen ohne Verengungen gewährleistet ist. Leider konnten keine Leistungsmessungen von TABSOLAR-Elementen als Solarkollektor durchgeführt werden. Es wird jedoch erwartet, dass auch in diesem Fall eine hohe Effizienz erreicht werden kann. Das ursprüngliche Ziel, auch 2 m² große Muster herzustellen, konnte während der Projektlaufzeit leider nicht erreicht werden. Es wurden aber bereits konkrete Planungen zur Fertigung geeigneter Werkzeuge mit Berücksichtigung von Aspekten einer späteren Serienproduktion durchgeführt.

Die erfolgreichen Arbeiten sollen in einem Folgeprojekt TABSOLAR II fortgeführt werden, dessen Beginn für den Sommer 2015 geplant ist. Darin sollen vielversprechende Entwicklungspfade konsequent in Richtung Produktentwicklung geführt und neu aufgeworfene Fragestellungen beantwortet werden. Dies betrifft insbesondere die Dimensionierung der TABSOLAR-Elemente (praxisrelevante Größen, z. B. 2 m² oder größer) und der Kanäle (v. a. in Bezug auf Innendruckbeständigkeit), die dampfdiffusionsdichte Gestaltung (z. B. durch Auskleidung

der Kanäle) sowie die Oberflächen der Elemente (Beschichtungen, Struktur, Farbe). Die Konkretisierung dieser Aufgaben soll im Systemkontext entstehen, d. h. es sollen ausgehend von verschiedenen Zielmärkten Anforderungen an die Komponentenentwicklung abgeleitet werden. Es sollen drei verschiedene Produktfamilien betrachtet werden. Im Hinblick auf TABSOLAR-Elemente praxistauglicher Größe soll das im Labormaßstab bereits erfolgreich umgesetzte Membran-Vakuumentziehverfahren nun in einer produktionsnahen Anlage realisiert werden. Damit die späteren Produkte für Fachleute, Architekten, Installateure oder Endkunden konkret erfahrbar werden, ist geplant, bis zum Ende von TABSOLAR II ein kleines Demonstrationsgebäude zu erstellen, das aus TABSOLAR-Fertigelementen besteht.

4 Danksagung

Die Autoren möchten sich im Namen des gesamten TABSOLAR-Konsortiums bei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) als Fördergeber sowie dem Projektträger Jülich (PTJ), namentlich Herrn Dr. Eerke Bunte, für die finanzielle Unterstützung und die Projektbegleitung bedanken, ohne die eine Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nicht möglich gewesen wären.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vision eines multifunktionalen TABSOLAR-Elements	5
Abbildung 2: Links: getestete Platten mit 4 mm Stärke, rechts: getestete Platten mit 8 mm Stärke und Glasfasern ohne Schädigung	11
Abbildung 3: Links: abgelöste Areale der Beschichtung, rechts: REM-Aufnahme der gestörten Randbereiche des Betons	12
Abbildung 4: Links: geprüfte Betonoberfläche aus einer optimierten Schalung, rechts: Oberfläche zeigt nach der Reinigung von Klebstoffresten keine Ablösungen von der Oberfläche	12
Abbildung 5: Links: eingebrachter Frischbeton vor dem Tiefziehen, rechts: tiefgezogener Frischbeton	13
Abbildung 6: Detail des tiefgezogenen Frischbetons.....	14
Abbildung 7: Ausgeschaltes, tiefgezogenes Bauteil	14
Abbildung 8: Verbunde aus Gewebe von Fa. Visiotex und UHPC von Fa. G.tecz	15
Abbildung 9: Aufbau der Wandungsbeschichtung mittels Epoxidharz.....	16
Abbildung 10: Mit Epoxidharz ausgekleidete Kanalwandungen	16
Abbildung 11: Skizze des Probenanschlusses zur Messung der Heliumdiffusion	18
Abbildung 12: In Epoxidharz bzw. Klebstoff eingegossene UHPC und Referenz aus Vollharz.....	19
Abbildung 13: Ergebnisse der Dampfdiffusionsmessung an unbeschichteten Proben mit rauer bzw. glatter Oberflächenbeschaffenheit, rot dargestellt sind Wiederholungsmessungen	20
Abbildung 14: Ergebnisse der Dampfdiffusionsmessung an unterschiedlich beschichteten Proben der Charge vom Apr 2014, s = 15 mm, glatte Oberfläche, rot dargestellt sind Wiederholungsmessungen	20

Abbildung 15: Kanalquerschnitte	22
Abbildung 16: Skizze eines fertigungsgerechten Kanalquerschnitts (links) und FEM-Analyse der Zugspannungen unter Innendruck (rechts).....	26
Abbildung 17: Querschnitte der breitesten FracTherm®-Kanäle Typ E.....	26
Abbildung 18: Zugspannungsverteilung in verschiedenen Kanalquerschnitten (oben und Mitte Typ E aus Abbildung 17, unten Typ F) und -wandstärken, Kanalbreite: 15 mm	27
Abbildung 19: Maximale Zugspannungen bei verschiedenen Kanalquerschnitten und -wandstärken (WS) in Abhängigkeit der Kanalbreite.....	28
Abbildung 20: Maximale Zugspannungen in Abhängigkeit der Dicke der WDS	29
Abbildung 21: Maximale Zugspannungen in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls der WDS (Dicke: 20 mm)	29
Abbildung 22: Die Optimierung durch Deformation im Fertigungsprozess senkt die max. Spannungen um ca. 14 %.....	30
Abbildung 23: Schnitt durch das mit Epoxidharz ausgekleidete TABSOLAR-Element.....	31
Abbildung 24: Maximale Zugspannungen in Kanälen ohne und mit Auskleidung	31
Abbildung 25: Maximale Zugspannungen in breiten Kanälen ohne und mit Auskleidung	31
Abbildung 26: Aus einem in einen Baum (hier Pappelast) gebohrten Kreisloch (a) entsteht durch neu gebildete Holzfasern eine Spindel. Auch die Querschnitte der Holzstrahlen (b) und Aussparungen im Skelett des Teddybearkaktus (c) weisen in Kraftflussrichtung orientierte Spindeln auf	32
Abbildung 27: Verformungen (stark vergrößert) einer durch Eigengewicht belasteten, an 6 Stellen gelagerten zweischichtigen Platte	33
Abbildung 28: Verteilung der Zugspannungen auf der Unterseite der gelochten Plattenschicht	33

Abbildung 29: Vektorplot der Hauptnormalspannungen auf der Plattenunterseite (Viertelmodell)	35
Abbildung 30: Verteilung der Zugspannungen in der optimierten Lochschicht (Viertelmodell)	35
Abbildung 31: Verteilung der Zugspannungen in den verschiedenen Modellen. Im Vergleich zum Ausgangsmodell a) (Schichtdicke $h = 10$ mm, Kreisdurchmesser $D = 80$ mm, Materialbedarf $m = 100$ %) sind die maximalen Zugspannungen in den Modellen b), c) und d) um ca. 30 % reduziert. b) Optimiertes Ellipsenmodell, $h = 10$ mm, $m = 130$ %. c) Aufgedicktes Modell, $h = 25$ mm, $D = 80$ mm, $m = 250$ %. d) Modell mit kleineren Löchern, $h = 10$ mm, $D = 50$ mm, $m = 170$ %	36
Abbildung 32: Temperaturverteilung eines UHPC-Absorbers entlang der Oberfläche (oben) und im Querschnitt sowie ermittelter Kollektorwirkungsgradfaktor F' (unten). Randbedingungen: $U_L = 3,5$ W/(m ² K), $h_{fi} = 500$ W/(m ² K), $G(\tau\alpha)_e = 800$ W/m ² , $T_{fluid} = 298$ K, $T_{amb} = 293$ K	37
Abbildung 33: Temperaturverteilung von TABSOLAR-Kanälen mit unterschiedlichen Kanalabständen und Wandstärken	37
Abbildung 34: Erstellung eines Knotenmodells aus realer Geometrie: Temperaturverlauf aus numerischer Simulation (links), Aufteilung in fünf Bereiche entsprechend Isothermenverlauf (Mitte), RC-Netzwerk als Knotenmodell (rechts)	39
Abbildung 35: TABSOLAR-Element (links) und Kollektor-Testmodell (rechts) in Dymola/Modelica	39
Abbildung 36: Angenommener Solarstrahlungsverlauf zur Untersuchung der "Sprungantwort" des TABSOLAR-Elements	40
Abbildung 37: Temperaturverläufe der einzelnen Bereiche (COMSOL, Index "comsol") bzw. Knoten (Dymola/Modelica, Index "sim") nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36; $T_{fluid} = 20$ °C, $T_{ambient} = 20$ °C....	40
Abbildung 38: Temperaturverläufe der einzelnen Bereiche (COMSOL, Index "comsol") bzw. Knoten (Dymola/Modelica, Index "sim") nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36; $T_{fluid} = 60$ °C, $T_{ambient} = 20$ °C....	41

Abbildung 39: Verlauf des Wärmestroms zum Fluid nach Aufprägen des Solarstrahlungsverlaufs gemäß Abbildung 36 (COMSOL, Index "comsol", bzw. Dymola/Modelica, Index "sim"); $T_{\text{fluid}} = 20\text{ °C}$, $T_{\text{ambient}} = 20\text{ °C}$	41
Abbildung 40: Temperaturverläufe des Modellabsorbers als Sprungantwort auf die Änderung der Eintrittstemperatur zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität nach EN 12975	42
Abbildung 41: Grundsätzliche Schritte des vom Fraunhofer ISE entwickelten Membran-Vakuumentiefziehverfahrens: 1. Auftragen der Gießmasse, 2. Evakuieren der Tiefziehform, 3. Zusammenfügen von Ober- und Unterteil, 4. Entformen	43
Abbildung 42: FracTherm [®] -Kanalquerschnitte der breitesten und der schmalsten Kanäle des Musterelements.....	45
Abbildung 43: FracTherm [®] -Struktur des Musterelements mit beispielhaften Kanalquerschnitten (grün).....	45
Abbildung 44: Werkzeug für das Membran-Vakuumentiefziehverfahren: a) späteres Oberteil mit Formplatte (noch ohne Kanäle), b) Silikonmembran aufgelegt, c) Silikonmembran geklemmt und gespannt, d) Werkzeug zusammengebaut (später umgedreht)	46
Abbildung 45: Formplatte mit eingefräster FracTherm [®] -Rinnenstruktur ohne (links) und mit Vakuum (rechts)	47
Abbildung 46: Durchführung des ersten Membran-Vakuumentiefziehversuchs mit UHPC: a) Auftragen des UHPC, b) FracTherm [®] -Struktur nach Tiefziehen, c) Abziehen der ebenen Platte, d) Zusammenfügen von Ober- und Unterteil (UHPC noch frisch).....	48
Abbildung 47: Hergestelltes TABSOLAR-Element.....	49
Abbildung 48: Schnitte durch das TABSOLAR-Element (links) und Detail (rechts)	49
Abbildung 49: TABSOLAR-Element mit Relief und aufgebrachtet spektralselektiver Schicht mit unterschiedlichen Farben	49
Abbildung 50: Aufgebrachtes Muster zur Anwendung als Sichtelement	50

Abbildung 51: 3D-gedruckter Anschlussstutzen für Durchströmungsversuche	50
Abbildung 52: Halbzeug mit eingebettetem 3D-Gewebe.....	50
Abbildung 53: Prinzipielle Idee des Eingießens textiler Kanalstrukturen, links: Umgießen der 3D-Textilstruktur, rechts: Aufblasen bis zur Aushärtung	51
Abbildung 54: Beispielhafte FracTherm®-Struktur als Basis für erste Untersuchungen zu textilen Kanalstrukturen.....	52
Abbildung 55: Erstes Textilmuster, beidseitig, ohne Vorformung der Kanäle ..	53
Abbildung 56: Zweites Textilmuster, einseitig, mit Vorformung der Kanäle	53
Abbildung 57: Textil mit FracTherm®-Struktur ohne Füllung.....	54
Abbildung 58: EPS-Granulat	55
Abbildung 59: Einfüllen des EPS-Granulats in Textil	55
Abbildung 60: Befülltes Textil (links) und Detail (rechts).....	56
Abbildung 61: Beschädigte Stellen an den FracTherm®-Kanälen, Austritt von Granulat (durch rote Farbe und Schrauben markiert).....	56
Abbildung 62: Einfache Schalung mit Textil (links); Schläuche (blau) für das Entleeren nach dem Betonieren (rechts).....	57
Abbildung 63: Einbetonieren der 3D-Textilstruktur: a) Auflegen des Textils auf untere Frischbetonschicht, b) Befestigen und Spannen des Textils an der Schalung mit Nägeln, c) Aufbringen der oberen Frischbetonschicht, d) fertig betoniertes 3D-Textil.....	57
Abbildung 64: Schnitt durch das ausgeschalte Bauteil nach Aushärten des Betons und Entleeren der Kanäle	58
Abbildung 65: Unbeschichtete (links) und spektralsektiv beschichtete (rechts) UHPC-Proben	59
Abbildung 66: Spektralsektiv beschichtete UHPC-Proben	60

Abbildung 67: Reflexionsspektren der spektralsektiv beschichteten UHPC-Proben	61
Abbildung 68: Inline-oberflächenvorbehandelte und anschließend spektralsektiv beschichtete UHPC-Platten. Haftfest direkt nach dem Beschichten.	62
Abbildung 69: Reflexionsspektren der inline-oberflächenvorbehandelten und anschließend spektralsektiv beschichteten UHPC-Platten.....	62
Abbildung 70: Reflexionsspektren der inline-oberflächenvorbehandelten und anschließend spektralsektiv beschichteten UHPC-Platten mit anderem IR-Spiegel	63
Abbildung 71: Vergleich der Haftfestigkeit der spektralsektiven Beschichtung auf säurebehandeltem UHPC (rechts) bzw. auf unbehandeltem UHPC (links) .	64
Abbildung 72: Vergleich der Reflexionsspektren von säurebehandeltem bzw. unbehandeltem spektralsektiv beschichteten UHPC	64
Abbildung 73: Vergleich der Reflexionsspektren von wärmebehandeltem bzw. unbehandeltem spektralsektiv beschichteten UHPC	65
Abbildung 74: Zusätzliche Haftschichten direkt auf dem UHPC unter dem IR-Spiegel zu Verbesserung der Schichthaftung.....	66
Abbildung 75: 8 Monate nach dem Beschichten teilweiser Abzug der spektralsektiven Schicht mittels Tesafilm.....	67
Abbildung 76: Vergleich der Reflexionsspektren direkt nach dem Beschichten (blau) bzw. nach teilweisem Abzug des Schichtsystems nach 8 Monaten (rot)	67
Abbildung 77: Komplettes TABSOLAR-Element vor dem Beschichten (oben) und nach dem Beschichten der ebenen Rückseite (unten).....	68
Abbildung 78: UHPC-Halbzeuge mit Textilien vor (oben und links unten) und nach der Beschichtung (rechts unten)	69
Abbildung 79: Vergleich der Reflexionsspektren der UHPC-Halbzeuge mit und ohne Wasserglas.....	70

Abbildung 80: UHPC-Halbzeug mit Wasserglas nach der Wärmebehandlung (links) und nach anschließender Beschichtung (rechts).....	70
Abbildung 81: Am ISE spektralselektiv beschichtete Gewebemuster: a) Druckgewebe „gelb“, b) Silbergewebe „alu“, c) Silikongewebe „alu“, d) Verdeckgewebe „schwarz“	72
Abbildung 82: Am ISE spektralselektiv beschichtetes handelsübliches Druckerpapier (links) und Backpapier (rechts)	73
Abbildung 83: Reflexionsspektren der spektralselektiv beschichteten Papiersorten	74
Abbildung 84: Nichtselektiv lackierte UHPC-Platten.....	75
Abbildung 85: Vergleich der Reflexionsspektren von lackierten bzw. spektralselektiv beschichteten UHPC-Platten	75
Abbildung 86: Durchgefärbte UHPC-Proben	76
Abbildung 87: Reflexionsspektren der durchgefärbten, unbeschichteten UHPC-Proben mit zugehörigem Absorptions- und Emissionsgrad.....	76
Abbildung 88: Schematischer Aufbau der Fassade	79
Abbildung 89: Temperatur (rot), Taupunkttemperatur (lila), Wassergehalt (blau) und relative Feuchte (grün) im Fassadenquerschnitt für 1. Jan. 01:00 (oben), 07. Aug. 15:00 (Mitte) und 31. Dez. 24:00 (unten)	80
Abbildung 90: Konzept einer direkten Verbindung von TABSOLAR-Element und EPS-Wärmedämmung	81
Abbildung 91: Verbund zwischen TABSOLAR-Element und konstruktivem Teil durch Anker	82
Abbildung 92: 3D-gedruckte mögliche Anschlusskonzepte für TABSOLAR-Musterelemente: Einsteckelement (links), Auflageelemente (rechts).....	84
Abbildung 93: Mit Epoxidharz auf TABSOLAR-Element aufgeklebte 3D-gedruckte Schlauchanschlüsse.....	84

Abbildung 94: Wirkungsgradkennlinien abgedeckter TABSOLAR-Kollektoren mit unbeschichteter Glasscheibe.....	88
Abbildung 95: Wirkungsgradkennlinien abgedeckter TABSOLAR-Kollektoren mit Glasscheibe mit Low-E-Beschichtung auf Position 2.....	88
Abbildung 96: Wirkungsgradkennlinien unabgedeckter TABSOLAR-Kollektoren	89
Abbildung 97: Solare Deckungsraten der simulierten TABSOLAR-Varianten und des Referenzsystems	90
Abbildung 98: Drei verschiedene Wandaufbauten, die mittels Ökobilanz miteinander verglichen wurden.	92
Abbildung 99: Detailansicht aus Fallstudie II.....	93
Abbildung 100: Thermografieaufnahme eines Durchströmungsversuchs von einem TABSOLAR-Element (Fraunhofer ISE).....	94
Abbildung 101: Thermografieaufnahmen eines Durchströmungsversuchs von vier parallel/seriell verschalteten TABSOLAR-Elementen (Fa. Zehnder).....	95
Abbildung 102: Vorbereitung der ursprünglichen Anschlüsse (links) und Verformung (rechts).....	96
Abbildung 103: Wärmedämmung der Rohrleitungen (links) und Ersatzanschluss aus Stahl (rechts).....	97
Abbildung 104: Versuchsaufbau zur Leistungsmessung der vier TABSOLAR-Elemente	97
Abbildung 105: Heizkörper-Leistungskennlinie der vier TABSOLAR-Elemente .	98
Abbildung 106: Exponat auf der BAU 2015	100

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Thermische Eigenschaften der untersuchten UHPC Proben.....	17
Tabelle 2: Zugspannungen in Platten mit kreisförmigen Kanälen unter Innendruck. Die Zahlen links von den Spannungsplots kennzeichnen	

Kanaldurchmesser und Materialüberdeckung ober- und unterhalb der Kanäle. Die höchstbelasteten Bereiche sind rot, kaum belastete Bereiche sind blau dargestellt	23
Tabelle 3: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs C	24
Tabelle 4: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs B.....	24
Tabelle 5: Zugspannungen in Platten mit Kanälen des Typs A	25
Tabelle 6: Spannungen in Platten mit Kanälen des Typs A unter Biegebelastung	25
Tabelle 7: Absorptions- und Emissionsgrade der spektralselektiv beschichteten Gewebeproben.....	73
Tabelle 8: Maximaltemperaturen von Dämmstoffen (Quelle: FIW München)...	81
Tabelle 9: Absorptions- und Emissionsgrade von Absorber bzw. Glasscheibe der simulierten TABSOLAR-Varianten.....	86

7 Literaturverzeichnis

- [1] M. Hermann, Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport, Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- [2] M. Hermann, „FracTherm - Fraktale Hydraulikstrukturen für Solarabsorber und andere Wärmetauscher,“ in *13. OTTI-Symposium „Thermische Solarenergie“, 14.-16. Mai 2003*, Bad Staffelstein, 2003.
- [3] M. Hermann, „Entwicklung des FracTherm-Absorbers - Simulationen und Experimente,“ in *15. OTTI-Symposium "Thermische Solarenergie", 27.-29. April 2005*, Bad Staffelstein, 2005.
- [4] „BIONICOL - DEVELOPMENT OF A BIONIC SOLAR COLLECTOR WITH ALUMINIUM ROLL-BOND ABSORBER,“ [Online]. Available: <http://www.bionicol.eu/>. [Zugriff am 23. März 2015].
- [5] „STAHLABS - Entwicklung von Flachsolarkollektoren in Stahlbauweise auf Basis partiell plattierter Hybridhalbzeuge,“ [Online]. Available: <http://www.stahlabs.de/>. [Zugriff am 23. März 2015].
- [6] L. Koch, F. Kennemann, C. Jerg, U. Horn, F. Steinbach, E. Tekkaya und M. Hermann, „Steel Absorbers in Mass Production – Challenges, Opportunities and produced samples,“ in *EuroSun 2014, 16-19 September 2014, Aix-les-Bains (France)*, 2014.
- [7] J. Rösler, H. Harders und M. Bäker, „Mechanisches Verhalten der Faserverbundwerkstoffe,“ in *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, Springer, 2012.
- [8] C. Mattheck, Denkwerkzeuge nach der Natur, Karlsruhe: KIT, 2010.
- [9] J. D. Currey, „Stress concentrations in bone,“ *J. Microscop. Sci.*, Nr. 103, pp. 111-133, 1962.