

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03ET1310A/B/C/D
Projektlaufzeit: 1.12.2015 – 30.6.2019

Schlussbericht



Autorinnen und Autoren:

Dr.-Ing. Michael Hermann (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. Lotta Koch (Fraunhofer ISE)
Dr. Christina Hildebrandt (Fraunhofer ISE)
Dr. rer. nat. Carmen Jerg (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. (FH) Paolo Di Lauro (Fraunhofer ISE)
Dipl.-Ing. Wolfgang Graf (Fraunhofer ISE)
Felix Ohr, M.Eng. (Fraunhofer ISE)
Dr.-Ing. Christoph Maurer (Fraunhofer ISE)

Dipl.-Ing. (FH) Susanne Spürgin (Spürgin)
Richard Riske (Spürgin)
Dr.-Ing. Thomas Teichmann (G.tecz)
Dipl.-Ing. Tino Sablotny (G.tecz)
Dipl.-Ing. Paul-Rouven Denz (Priedemann Facade-Lab)
Puttakhun Vongsingha, MSc. Arch. (Priedemann Facade-Lab)
Dipl.-Kfm. Sebastian Schulz (Priedemann Facade-Lab)
Dr.-Ing. Iwiza Tesari (Karlsruher Institut für Technologie KIT)

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

Das Copyright der Fotos, Grafiken und Diagramme liegt – wenn nicht anders angegeben – bei den jeweiligen Projektpartnern. Vor jeglicher Weiterverwendung ist mit ihnen Kontakt aufzunehmen.

Inhalt

1	Einleitung.....	5
1.1	Ausgangssituation und Ziele	6
1.2	Konsortium	7
1.3	Projektdurchführung	8
1.4	Ergebnisse in diesem Bericht.....	8
2	Projektergebnisse.....	9
2.1	Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme aus TABSOLAR I und Konkretisierung der Entwicklungspfade für drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Premium</i> , TABSOLAR® <i>Economy</i> und TABSOLAR® <i>Design</i>	9
2.1.1	<i>Zusammenfassung</i>	9
2.1.2	Fassadensysteme und Produktfamilien	10
2.1.3	Beschichtung	14
2.2	Arbeitspaket 2: Entwicklung und Herstellung von spektralsektiv beschichteten Halbzeugen	16
2.2.1	<i>Zusammenfassung</i>	16
2.2.2	Oberflächenuntersuchung mittels Stereomikroskopie und REM/EDX	16
2.2.3	Spektralselektive Beschichtung zwischen Lackschichten	18
2.2.4	Beschichtung von Messeexponaten.....	42
2.3	Arbeitspaket 3: Ausarbeitung eines Konzepts zur Herstellung langzeit-beständiger durchströmbarer Bauteile aus UHPC inklusive hydraulischer Anschlusstechnik	44
2.3.1	<i>Zusammenfassung</i>	44
2.3.2	Diffusionsdichte Kanäle	44
2.3.3	Sammelkanäle und Hydraulikanschlüsse	49
2.3.4	Mechanische Untersuchungen	65
2.3.5	Befestigung von TABSOLAR®-Elementen und Hydraulikverbinder	80
2.4	Arbeitspaket 4: Herstellung und Charakterisierung von UHPC- Fertigteilen für drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Premium</i> , TABSOLAR® <i>Economy</i> und TABSOLAR® <i>Design</i>	84

2.4.1	<i>Zusammenfassung</i>	84
2.4.2	Konstruktion und Bau einer Fertigungsanlage	85
2.4.3	Auslegung und Fertigung von Werkzeugen	87
2.4.4	Entwicklung und Herstellung von UHPC-Mischungen	97
2.4.5	Herstellung durch Membran-Vakuumtiefziehverfahren	109
2.4.6	Fassadenkonzepte	117
2.4.7	Exponate für Messe BAU 2017 und 2019.....	122
2.5	Arbeitspaket 5: Systemsimulationen, Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Lebenszyklusbetrachtungen für drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Premium</i> , TABSOLAR® <i>Economy</i> und TABSOLAR® <i>Design</i> sowie Empfehlungen für praktische Umsetzung	128
2.5.1	<i>Zusammenfassung</i>	128
2.5.2	Modellierung und Systemsimulationen	129
2.5.3	Life Cycle Assessment (LCA).....	141
2.5.4	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	156
2.5.5	Praktische Umsetzung	159
2.6	Arbeitspaket 6: Konzeptionierung, Entwurf, Bau und Inbetriebnahme eines Demonstrationsgebäudes	162
2.6.1	<i>Zusammenfassung</i>	162
2.7	Arbeitspaket 7: Mitarbeit am IEA-Task »Multifunctional Façades«	167
2.7.1	<i>Zusammenfassung</i>	167
2.8	Zahlenmäßiger Nachweis.....	168
2.9	Notwendigkeit der Arbeit	168
2.10	Verwertbarkeit der Ergebnisse	168
2.11	Relevante Ergebnisse von dritter Seite	169
2.12	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	169
3	Zusammenfassung und Ausblick	171
4	Danksagung	175
5	Abbildungsverzeichnis	176

6	Tabellenverzeichnis	190
7	Literaturverzeichnis	194

1 Einleitung

Gebäude verursachen in Deutschland etwa 35 Prozent des Endenergieverbrauchs und etwa 30 Prozent der CO₂-Emissionen¹. Daher kommen sowohl der Wärmedämmung als auch den Heiz- und Kühlkonzepten eine wesentliche Bedeutung zu. Dies betrifft einerseits den Neubau, andererseits aber insbesondere auch die Sanierung von Gebäuden. Eine CO₂-freie Wärmeversorgung von Gebäuden kann insbesondere durch Wärmepumpen mit Strom aus erneuerbaren Energien, Solarthermie und/oder Biomasse erfolgen. Dabei sind Niedertemperaturheizungen zu bevorzugen, weil sich damit sowohl höhere Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen als auch höhere Solarerträge aus Sonnenkollektoren erreichen lassen. Niedrige Vorlauftemperaturen erfordern wiederum größere Heizflächen, weshalb die Wärme über Flächenheizsysteme (Fußboden-, Wand-, Deckenheizung) bereitgestellt werden sollte.

Das TABSOLAR®-Konzept hat zum Ziel, bestehende Lösungen durch neuartige durchströmbare Bauelemente aus Ultrahochleistungsbeton (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) zu ergänzen. TABSOLAR®-Elemente sollen sowohl als verglaste oder unverglaste Solarkollektoren an der Fassade als auch als thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) zum Heizen und/oder Kühlen von Innenräumen zum Einsatz kommen.

Um Solarenergie – sowohl Photovoltaik als auch Solarthermie – großflächig einsetzen zu können und dabei gleichzeitig möglichst wenig Fläche zusätzlich versiegeln zu müssen, bietet es sich an, bereits vorhandene oder schon geplante Gebäudehüllflächen zu nutzen. Bezogen auf die Nutzfläche bzw. den Energiebedarf ist die Dachfläche bei mehrgeschossigen Gebäuden relativ gering, weshalb es vor allem dort sinnvoll ist, auch die Fassadenfläche zur Energiegewinnung zu nutzen. Dabei ist auch vorteilhaft, dass die Sonne während der Heizperiode im Winter tiefer steht als im Sommer und dadurch der Einfallswinkel auf die Kollektoren günstiger ist als auf dem Dach. Im Sommer wiederum werden mit Fassadenkollektoren durch die hoch stehende Sonne Überschüsse bzw. Stagnationszeiten reduziert.

Fassaden werden deutlich mehr wahrgenommen als Dächer und besitzen daher eine hohe architektonische Relevanz; sie stellen quasi das »Angesicht« eines Gebäudes dar. Deshalb

¹<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#eigentuemer>

kommt den architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten von Fassaden eine besondere Bedeutung zu.

TABSOLAR®-Elemente aus Ultrahochleistungsbeton sind im Hinblick auf die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten attraktiv, weil sowohl ihre Geometrie als auch ihre Oberflächenstruktur und Farbe an die Wünsche des Architekten bzw. des Bauherrn angepasst werden können.

1.1 Ausgangssituation und Ziele

Im Vorgängerprojekt TABSOLAR² (im Folgenden »TABSOLAR I« genannt), das ebenfalls vom BMWi gefördert worden war, waren erste grundlegende Untersuchungen zur Herstellung kleiner Elemente im Labormaßstab und zur spektralselektiven Beschichtung sowie Messungen und erste Systemsimulationen durchgeführt worden.

Das Projekt TABSOLAR II hatte zum Ziel, das Membran-Vakuumtiefziehverfahren als Fertigungstechnologie vom Labor- in den Technikumsmaßstab zu übertragen, um damit TABSOLAR®-Elemente in marktrelevanten Größen herstellen zu können. Außerdem sollten Lösungen für die bislang nicht dampfdiffusionsdichten Kanäle gefunden werden. Im Hinblick auf mögliche Zielmärkte sollten die drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* (hoch-effiziente Fassadenkollektoren mit spektralselektiver Beschichtung und Antireflexverglasung, vergleichbar mit solarthermischen Kollektoren nach dem Stand der Technik), TABSOLAR® *Economy* (lackierte bzw. durchgefärbte Elemente mit Low-E-Verglasung, etwas geringeren Erträgen und erreichbaren Temperaturniveaus) und TABSOLAR® *Design* (unverglaste Kollektoren als Designelemente mit verschiedenen Strukturen und/oder Farben, jedoch noch geringeren Erträgen und erreichbaren Temperaturniveaus) betrachtet werden. Bezüglich der spektralselektiven Beschichtung sollte auch untersucht werden, inwiefern beschichtete Halbzeuge – z. B. UHPC-Textil-Verbunde, Folien oder silikonbeschichtete Gewebe – anstelle einer Direktbeschichtung des UHPC eine Option darstellen. Schließlich war auch ein kleines Demonstrationsgebäude geplant, um die TABSOLAR®-Technologie erlebbar zu machen.

² Förderkennzeichen: 03ET1117A/C/D, Projektlaufzeit: 1.10.2012-30.9.2014

1.2 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 GmbH

(Verbundpartner)
Eichwaldstr. 38
34122 Kassel

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Thomas Teichmann

Priedemann Facade-Lab GmbH

(Verbundpartner)
Am Wall 17
14979 Großbeeren

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Paul-Rouven Denz

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

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

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Iwiza Tesari

1.3 Projektdurchführung

Im Laufe des Projekts fanden insgesamt sieben Projekttreffen des Gesamtkonsortiums statt, eines davon in Freiburg, zwei in Teningen, zwei in Großbeeren, eines in München und eines in Kassel. Darüber hinaus gab es Arbeitstreffen im kleineren Kreis, z. B. zu Diffusionsuntersuchungen, Sammelkanälen und Hydraulikanschlüssen in Freiburg oder zur Fertigung großer TABSOLAR®-Elemente in Teningen.

1.4 Ergebnisse in diesem Bericht

Ein Teil der Arbeiten wurde durch das Konsortium noch nach dem Projektende durchgeführt. Da dabei noch wichtige Ergebnisse erzielt wurden, hat sich das Konsortium nach Rücksprache mit PtJ dazu entschieden, diese teilweise auch in diesen Bericht aufzunehmen.

2 Projektergebnisse

2.1 Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme aus TABSOLAR I und Konkretisierung der Entwicklungspfade für drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design*

2.1.1 Zusammenfassung

Es wurden Fassadensysteme bzw. Kollektor- und TABS-Lösungen analysiert, um Konstruktionen, Preise, architektonisches Potenzial und Wirkungsgrad zu vergleichen. Auf Basis dieser Marktanalyse wurden einzelnen Entwicklungspfade im Hinblick auf Fassadensysteme in Kombination mit den Produktfamilien erarbeitet und im weiteren Projektverlauf in einem iterativen Prozess ausgearbeitet. Es wurden Überprüfungen und Recherchen zu Wohn- und Industriegebäuden durchgeführt (verfügbare Flächen, Brüstungshöhen, ...) und Vor- und Nachteile kleiner Elementgrößen analysiert. Im Projektkonsortium einigte man sich aufgrund der Analyse und Expertise der Partner auf folgende Entwicklungspfade:

- 1) WDVS (Wärmedämmverbundsystem) mit TABSOLAR® *Design*
- 2) VHF (vorgehängte hinterlüftete Fassade) mit TABSOLAR® *Premium*
- 3) Sandwichwand mit TABSOLAR® *Premium*

Die Arbeiten konzentrierten sich schließlich auf das Konzept der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF), weil sie eine Option für alle Produktfamilien darstellt und sowohl für den Neubau als auch für die Sanierung geeignet ist. Für die festgelegten drei TABSOLAR®-Produktfamilien werden folgende konkreten Beschichtungskonzepte vorgeschlagen:

TABSOLAR® *Premium*:

UHPC / Lack (Wasserglas o. ä. als Haftsicht und Barriere gegen Wasser aus UHPC) / spektralselektive Absorberschicht (Sputtern) / Abdeckscheibe

TABSOLAR® *Economy*:

Eingefärbter UHPC (nicht spektralselektiv), entweder durch a) durchgefärbten UHPC oder durch b) UHPC mit Solarlack (siehe dazu auch Ergebnisse aus TABSOLAR I) oder UHPC als Sichtbeton, Abdeckung mit kommerzieller Low-E-Glasscheibe. Vorteil dieser Variante: Überlackierbarkeit, Nachteil: optische Werte schlechter als bei TABSOLAR® *Premium* und dadurch geringere Erträge

TABSOLAR® Design:

unverglastes Element: UHPC / Lack 1 (wie bei TABSOLAR® Premium) / spektralselektive Absorberschicht (Sputtern) / Lack 2

2.1.2 Fassadensysteme und Produktfamilien

Nachdem in TABSOLAR I prinzipielle Möglichkeiten der Fertigung und der Anwendungen gezeigt worden waren, sollten zu Beginn von TABSOLAR II nach einer Bestandsaufnahme die geplanten Entwicklungspfade für die drei Produktfamilien TABSOLAR® Premium, TABSOLAR® Economy und TABSOLAR® Design konkretisiert werden. Der grundsätzliche Ansatz von drei Produktfamilien ergibt sich aus der Komplexität der Anwendung einer solarthermischen/technischen Komponente in der gestalterisch relevanten Fassade. So adressiert TABSOLAR® Premium den Anspruch an einen abgedeckten Kollektor mit maximal möglichem Ertrag und Temperaturniveau (technisches Extrem), wohingegen TABSOLAR® Design den Beton als Oberfläche und Fassaden-Finish in den Fokus stellt (architektonisches Extrem). Da darüber hinaus die Entscheidung für oder gegen ein Produkt im Planungs- und Bauprozess oftmals über den Preis gefällt wird – vor allem bei vorangeschrittenem Planungsstand und erhöhtem Kostendruck – bietet es sich an, mit TABSOLAR® Economy eine Zwischenlösung anzubieten. Diese stellt einen abgedeckten Kollektor mit noch relativ hohem Ertrag und erreichbarem Temperaturniveau in Kombination mit kostengünstigerer und gestalterisch flexiblerer Absorberfläche, da ohne spektralselektive Beschichtung, dar. Diese Flexibilität erhöht außerdem die Akzeptanz bei Architekt und Bauherr, da man nicht wie bei herkömmlichen BIST³-Lösungen auf ein festgeschriebenes Produkt festgelegt ist. Im Verlauf des Projekts hat sich diese Varianz noch verstärkt, da die Möglichkeit der freibewitterten spektralselektiven Beschichtung für TABSOLAR® Design ergänzt wurde.

Durch Priedemann Facade-Lab wurden Fassadensysteme bzw. Kollektor- und TABS-Lösungen analysiert, um Konstruktionen, Preise, architektonisches Potenzial und Wirkungsgrad zu vergleichen. Auf Basis dieser Marktanalyse wurden einzelnen Entwicklungspfade im Hinblick auf Fassadensysteme in Kombination mit den Produktfamilien erarbeitet und im weiteren Projektverlauf in einem iterativen Prozess ausgearbeitet. Hierbei sind TABSOLAR® Premium und Economy ähnlich aufgebaut und daher baukonstruktiv gleichwertig zu betrachten. Die Produktfamilien wurden somit aus architektonischer und bau-

³ BIST: Bauwerkintegrierte Solarthermie

konstruktiver Sicht mit gängigen und technisch passenden Fassadensystemen abgeglichen: VHF (vorgehängte hinterlüftete Fassade; gängiges Fassadensystem für Betonpaneele), WDVS (Wärmedämmverbundsystem, gängiges Fassadensystem für Wohnungsbau/Sanierung) sowie Sandwichwand (Betonfertigteiltbau, gängiges Wandsystem für Fertigtbauten, Einfamilienhäuser, Fabrikbauten; hoher Anteil an Vorfertigung bei Betonbauer). Daraus ergaben sich unterschiedliche Kombinationen an Entwicklungspfaden. Diese wurden über den Projektverlauf in Varianten untersucht und fortlaufend bewertet.

Option for development direction only for facade element

Option 1

Develop all facade systems :

VHF, WDVS, SandwichWall x all product families

6 directions

PREMIUM/ECONOMY	VHF	WDVS	SandwichWall
DESIGN			

Option 2

Develop 1 facade system with all product families:

VHF x all product families

2 directions

PREMIUM/ECONOMY	VHF	WDVS	SandwichWall
DESIGN			

Option 3

Develop 2 facade systems with 1 product family:

VHF, SandwichWall x 1 product family per system

2 directions

PREMIUM/ECONOMY	VHF	WDVS	SandwichWall
DESIGN			

Option 4

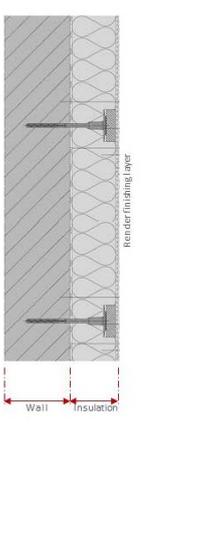
Develop 2 facade systems with suitable product family:

(VHF x all product families) + (SandwichWall x „Design“)

PREMIUM/ECONOMY	VHF	WDVS	SandwichWall
DESIGN			

Abbildung 1: Überblick Entwicklungspfade

Auf Basis dieser Entwicklungspfade, der Marktanalyse zu Gebäudetypologien und der Erfahrung der Partner wurde zu den drei Fassadensystemen grundlegende Anforderungen skizziert und definiert (Abbildung 2 bis Abbildung 4).



Vertical Section

Horizontal Section

- 1 – TABSOLAR panel
- 2 – Soft insulation
- 3 – Hard insulation
- 4 – Collecting duct with insulation
- 5 – Insulation fixing pin
- 6 – Steel or aluminum fixing
- 7 – Openable panel for service
- 8 – Waterproof membrane
- 9 – Adhesive mortar

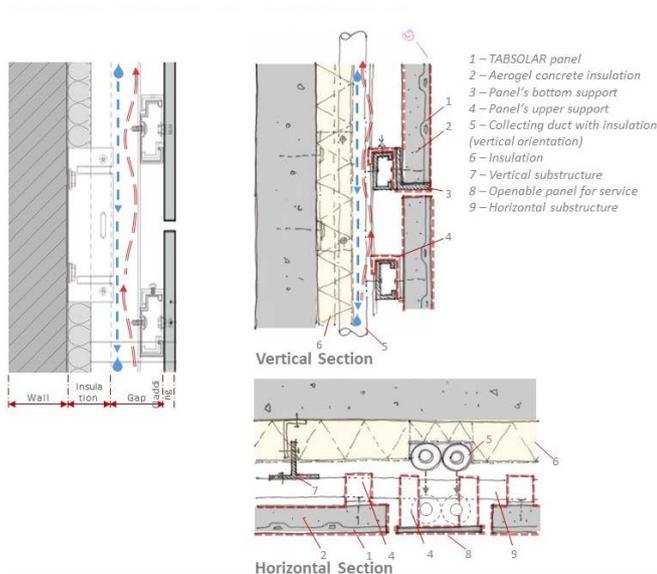
* During assembling process, the soft insulation is pressed by TABSOLAR panel leaving no gap for heat loss and ventilation.

Removable parts

Comparison

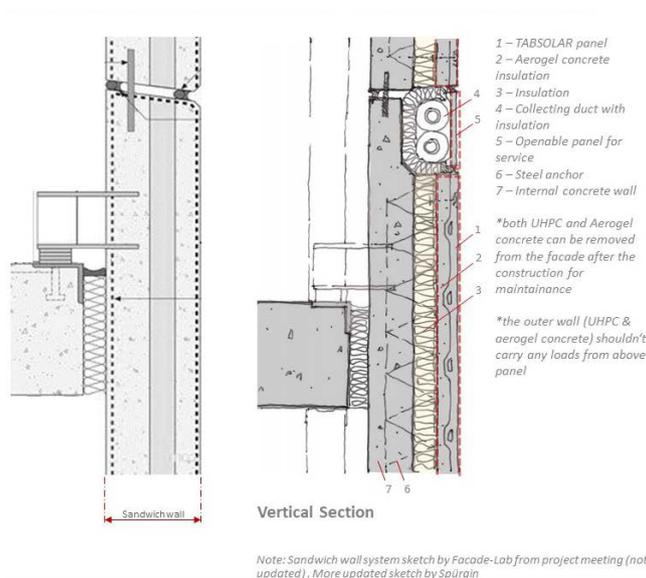
TABSOLAR WDVS	Conventional WDVS
- Removable panels provide easy access for insulation maintenance	- The finishing is permanent and cannot be removed
- Panel and insulation reusing or recycling is possible	- Problem with insulation is invisible and hard to be solved
- Complicated and required many step of installation due to the duct installation and connection to TABSOLAR panels	- Easy construction
- Installation might require a product specialist	- Common construction method which can be achieved by local craftsmanship
- Partly or completely prefabricated	- Completely onsite construction
- Faster construction process	- Low weather durability
- Higher weather durability due to UHPC properties and the coating	- Cleaning difficulty
- Easy to clean due to the quality of the surface and coating	- Always have condensation but with the plaster finishing, there is small ventilation space through the finishing where the humidity goes out. It reduces the damage to the insulation and structure wall
- At warm facade, it is more likely that there will be no condensation	- At cold facade, the condensation might occurs which the water could stay inside the facade because of UHPC air tightness property. The drainage route might be needed
- There might be some thermal bridges caused by substructure	- Low thermal bridges

Abbildung 2: Lasten und Pflichten WDVS



Comparison	
TABSOLAR VHF	Conventional VHF
- Heavier due to the back insulation and water inside the panel	- Lighter weight
- The flow in the panel can create movement in facade elements	
- Require stronger substructure system and structure wall	
- More complicated construction process due to the installation of the duct	- Simple construction method and faster construction because every elements are prefabricated and require only simple connection
- More difficult in order to remove the facade elements because the panels need to be detached from collecting ducts first	- Removing the facade element for maintenance or replacing is easy
- There can be more thermal bridges due to the bigger substructure	- Lower thermal bridges
- Thicker facade with an additional insulation (aerogelconcrete)	- Thinner facade

Abbildung 3: Lasten und Pflichten WDVS



Comparison	
TABSOLAR Sandwich Wall	Conventional Sandwich Wall
- Removable panel provide easy access for insulation maintenance	- Problem with insulation is invisible and hard to be solves
- Panel and insulation reusing/ recycling is possible	- Recycle is imposible without removing the structure wall
- The outer wall should not be used as structure due to the low structure properties of aerogelconcrete	
- The inner concrete panel can be thinner or steel anchor can be smaller if the outer wall (TABSOLAR + Aerogel concrete + water) is lighter than the conventional one. Which result in lighter thinner panel and lower thermal bridges	
- More complicated installation due to the collecting duct	- Simple installation
- No finishing required (painting/coating/rendering)	- Painting or rendering finish is required
- Higher surface durability and weather protection	- The surfacade durability depend on type of finishing
- At warm facade, it is more likely that there will be no condensation	- The condensation might occur depend on the tightness of the facade
- At cold facade, the condensation might occurs which the water could stay inside the facade because of UHPC air tightness property. The drainage route might be needed	

Abbildung 4: Lasten und Pflichten Sandwichwand

Die Fa. Spürgin führte Überprüfungen und Recherchen zu Wohn- und Industriegebäuden durch, die zu folgenden Ergebnissen führten:

- Die verfügbaren Flächen befinden sich meist unter oder neben den Fenstern.
- Die Musterbauordnung und Länderregelungen legen die Brüstungshöhen fest; diese liegen bei Wohnhäusern bis zu 12 m bei einer Absturzhöhe von 0,80 m, über 12 m bei 0,90 m.
- Bei Arbeitsstätten sehen diese bis zu 12 m eine Höhe von 1,00 m vor.

Weiterhin wurden die Vor- und Nachteile kleinerer Elementgrößen (kleiner als übliche Größen solarthermischer Kollektoren von ca. 2 m²) untersucht:

Vorteile:

- Lagerung der TABSOLAR®-Elemente
- Transport der TABSOLAR®-Elemente
- Herstellung und Prüfung der TABSOLAR®-Elemente
- Handling der TABSOLAR®-Elemente, z. B. beim Einbau, Montage der Glasscheibe, Austausch bei Beschädigungen
- Durchbiegung der Module
- Einfachere Bearbeitung bei Beschichtungen
- Verwendung der Module im Wohnungs- und Industriebau als auch bei Altbausanierungen

Nachteile:

- Mehr Verbindungen (Anschlüsse)
- Mehr Glasbefestigungen
- Verhalten der Durchströmung
- Glasscheiben sind kleiner (Gestaltung). Bei Erfordernis ist eine Abdeckung durch eine größere Glasscheibe machbar. In den Anschlussbereichen könnten die Glasscheiben sandgestrahlt werden, um die Anschlussboxen mittels Abdeckung aus UHPC optisch anzugleichen.

Im Projektkonsortium einigte man sich aufgrund der Analyse und Expertise der Partner auf folgende Entwicklungspfade:

- 1) WDVS (Wärmedämmverbundsystem) mit TABSOLAR® *Design*
- 2) VHF (vorgehängte hinterlüftete Fassade) mit TABSOLAR® *Premium*
- 3) Sandwichwand mit TABSOLAR® *Premium*

Final wurde aufgrund der Flexibilität, hohen Integrationsfähigkeit, Reversibilität und Markttauglichkeit ein Fokus auf das Fassadensystem VHF gelegt. Sie stellt eine Option für alle Produktfamilien dar und ist sowohl für den Neubau als auch für die Sanierung geeignet. Hierfür konnten auch innovative Befestigungstechniken herangezogen und untersucht werden. Durch die rückseitige Überdämmung des TABSOLAR®-Elements wurden aber auch Parallelen zu WDVS gezogen, die in einem weiteren Schritt auch die Ausweitung auf die anderen Fassadensystem (WDVS und Sandwichwand) ermöglichen.

2.1.3 Beschichtung

Die Umsetzbarkeit der verschiedenen Beschichtungskonzepte für die definierten Produktfamilien durch das Fraunhofer ISE wurde diskutiert. Für das unverglaste TABSOLAR®-Element *Design* wäre eine spektralselektive Absorberschicht ebenfalls sehr vorteilhaft, jedoch stellt generell die spätere Fassadenreinigung eine Herausforderung an die Beschichtung dar. Hier wäre eine spezielle Reinigungsanleitung für den Absorber samt speziellem Reinigungsmittel und Reinigungstuch ratsam, um Kratzer oder Flecken zu vermeiden. Daneben sind auch Berührungen der Beschichtung (durch Arbeiter bei Montage, Kinder, Tiere, Spielgeräte, etc.) kritisch zu sehen, da dies zu Flecken führen oder im schlimmsten Fall Ausgangspunkt für Korrosion sein könnte. Daher sollte eine dünne Lackschicht auf die spektralselektive Schicht aufgebracht werden, die etwas resistenter gegen Kratzer ist, aber das unterliegende Material nicht beschädigt. Wenn die Lackschicht hinreichend dünn ist, können Emissionsgrade von 30 bis 40 % erzielt werden (bei einem Absorptionsgrad von 90 %). Für TABSOLAR® *Design* wird folgendes Konzept vorgeschlagen:



Das UHPC-Halbzeug sollte zuerst lackiert (als Haftschicht und als Barriere gegen Wasserdiffusion aus dem UHPC), dann spektralselektiv beschichtet (Sputtern: IR-Spiegel, Cermet, AR-Schicht) und abschließend mit einem dünnen Schutzlack lackiert werden. Mittels Sputtern könnten auch unterschiedliche Farben des TABSOLAR®-Elements *Design* eingestellt werden. Dies hat nur sehr geringe Absorptionsverluste zur Folge. Eine weitere Herausforderung ist die geringe Schichtdicke des Lacks, um einen geringen Emissionsgrad bei ausreichender Kratzfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion zu erhalten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Frage, ob das gesamte TABSOLAR®-Element oder nur UHPC-Halbzeug beschichtet werden soll. Aufgrund der Ergebnisse aus TABSOLAR I sowie der logistischen Probleme bei Beschichtung des kompletten TABSOLAR®-Elements (Aufbewahrung beim Hersteller des Elements, dann Transport zum Beschichter, Handling, Gewicht) sowie der deutlich verlängerten Abpumpzeit vor dem Beschichtungsprozess (dieser Schritt ist der langsamste Prozessschritt und somit entscheidend für den Durchsatz und den Umsatz bzw. die Kosten der Beschichtung) wurde vorgeschlagen, prinzipiell nur UHPC-Halbzeug zu beschichten. Im Laufe des Projekts stellte sich jedoch heraus, dass die Verbindung der Elemente nur mit frischem Beton erfolgen kann, weshalb letztendlich doch das gesamte TABSOLAR®-Element beschichtet werden muss. In TABSOLAR I hat sich

zudem gezeigt, dass die Vorgeschichte des UHPC entscheidend ist. So sieht das erste Probestück vor Projektbeginn von TABSOLAR I immer noch sehr schön aus. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der UHPC schon sehr alt und somit ausgehärtet war und zudem eine sehr gute Oberflächenqualität aufwies. Zur beschleunigten Alterung vieler TABSOLAR®-Elemente könnte beispielsweise die Paternosteranlage bei Spürgin genutzt werden. Mit hohen Stagnationstemperaturen in der Fassade ist wohl eher nicht zu rechnen, da aufgrund des isothermen Verdampfungsvorgangs die Temperatur erst weiter ansteigt, wenn alles Fluid verdampft ist, was allerdings aufgrund des relativ hohen Fluidinhalts des TABSOLAR®-Elements erst abends auftreten dürfte, so dass ein weiteres Aufheizen nicht stattfinden sollte. Außerdem steht die Sonne im Sommer hoch, so dass die Einstrahlung viel geringer als bei einem Dachkollektor ist. Im Winter ist die Außentemperatur sehr niedrig und die Kapazität des TABSOLAR®-Elements sehr hoch, so dass vermutlich keine Gefahr besteht, dass der Druck im Kollektor zu hoch werden könnte.

Für die festgelegten drei TABSOLAR®-Produktfamilien werden folgende konkreten Beschichtungskonzepte vorgeschlagen:

TABSOLAR® Premium:

UHPC / Lack (Wasserglas o. ä. als Haftschrift und Barriere gegen Wasser aus UHPC) / spektralselektive Absorberschicht (Sputtern) / Abdeckscheibe

TABSOLAR® Economy:

Eingefärbter UHPC (nicht spektralselektiv), entweder durch a) durchgefärbten UHPC oder durch b) UHPC mit Solarlack (siehe dazu auch Ergebnisse aus TABSOLAR I) oder UHPC als Sichtbeton, Abdeckung mit kommerzieller Low-E-Glasscheibe. Vorteil dieser Variante: Überlackierbarkeit, Nachteil: optische Werte schlechter als bei TABSOLAR® Premium und dadurch geringere Erträge

TABSOLAR® Design:

unverglastes Element: UHPC / Lack 1 (wie bei TABSOLAR® Premium) / spektralselektive Absorberschicht (Sputtern) / Lack 2

2.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung und Herstellung von spektralselektiv beschichteten Halbzeugen

2.2.1 Zusammenfassung

Die Oberflächen von spektralselektiv beschichteten Betonproben wurden mit Hilfe eines Stereomikroskops sowie mittels REM/EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) im Hinblick auf die Kontaktzonen zwischen spektralselektiver Schicht und Betonoberfläche und deren chemische Elemente untersucht.

Für die spektralselektive Variante der Produktfamilie TABSOLAR® *Design* konnte ein Schichtsystem entwickelt werden, das die beschleunigten Alterungstests

- 12 Tage Klimaschrank bei 85 °C und 85 % rel. Feuchte
- 500 h Ofen bei 160 °C
- 21 Tage UV (7fache Konzentration gegenüber AM 1,5)

unbeschadet übersteht. Dieses Schichtsystem ist sowohl für von G.tecz als auch für von Spürgin gefertigte UHPC geeignet. Der Aufbau ist wie folgt:

- UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1

Für UHPC von G.tecz wäre ebenso folgendes Schichtsystem geeignet:

- UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1

Bei Spürgin erwies sich die Verwendung einer bestimmten (roten) Schalttafel (ohne Schalöl) als vorteilhaft, um eine möglichst hohe Oberflächenqualität und damit geringen Emissionsgrad der spektralselektiven Absorberschicht zu erzielen.

Für die Messe BAU 2017 wurden kleine Handmuster und für die Messe BAU 2019 große TABSOLAR®-Elemente und UHPC-Platten ohne Kanäle für das Exponat der Produktfamilie TABSOLAR® *Premium* spektralselektiv beschichtet.

2.2.2 Oberflächenuntersuchung mittels Stereomikroskopie und REM/EDX

Im Rahmen der Nachbearbeitung der Versuchsergebnisse aus TABSOLAR I wurden die Oberflächen von spektralselektiv beschichteten Betonproben mit Hilfe eines Stereomikro-

sokops sowie mittels REM/EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) bei G.tecz untersucht. Ziel war die Untersuchung der Kontaktzonen zwischen spektralselektiver Schicht und Betonoberfläche, um mögliche, für den Schichtenverbund nachteilige Reaktionsprodukte zu untersuchen.

Abbildung 5 und Abbildung 6 stellen Probenoberflächen von Versuchskörpern aus dem Projekt TABSOLAR dar, welche einen ausreichenden Schichtenverbund aufweisen. Bei der untersuchten Probe wurde eine frische Bruchfläche im Bereich des Schichtenübergangs untersucht.

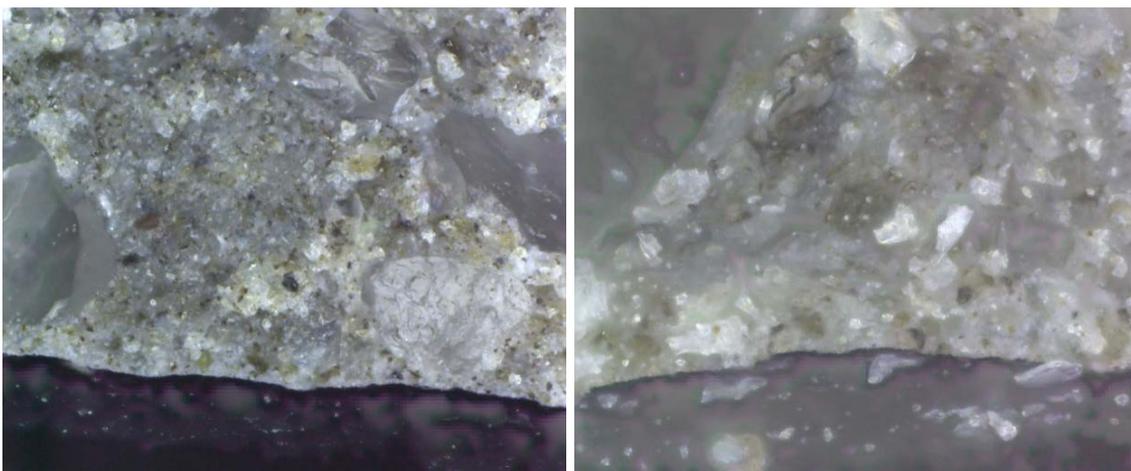


Abbildung 5: Probe aus TABSOLAR I bei 20facher (links) bzw. 50facher (rechts) Vergrößerung, untersucht mittels Stereomikroskop

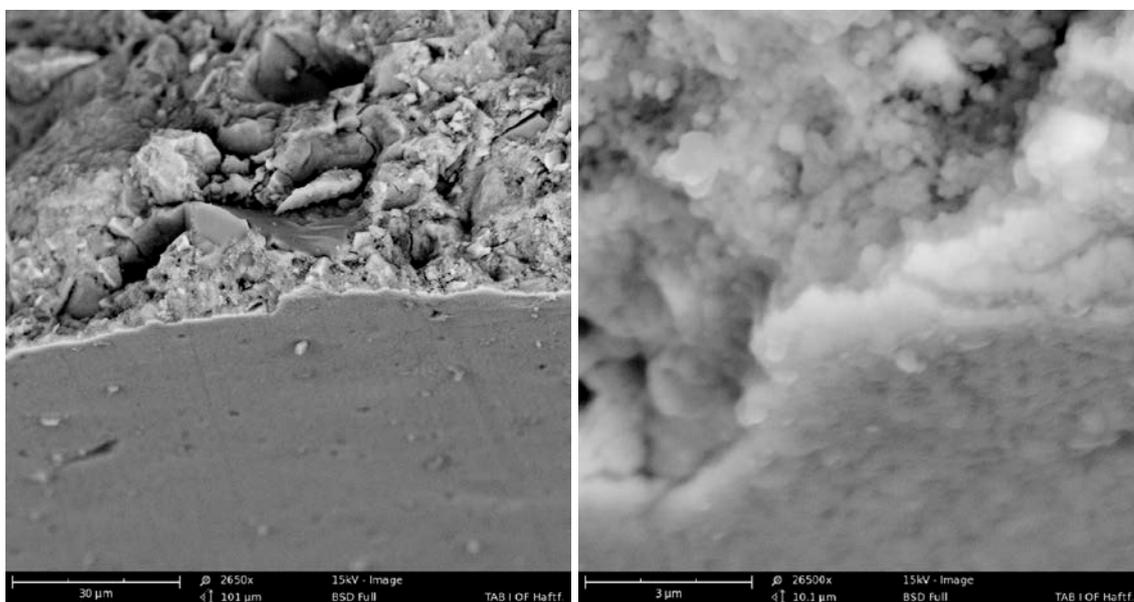


Abbildung 6: Bruchfläche einer beschichteten Betonprobe aus TABSOLAR I, untersucht mittels REM, Bildhöhe 101 µm (links); Detail, Übergang UHPC/spektralselektive Beschichtung, Bildhöhe 10,1 µm (rechts)

Im Rahmen der Probenuntersuchung wurden die oberflächennahen chemischen Elemente im Übergangsbereich zwischen Beton und spektralselektiver Schicht mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht. Abbildung 7 stellt die detektierten Elemente dar.

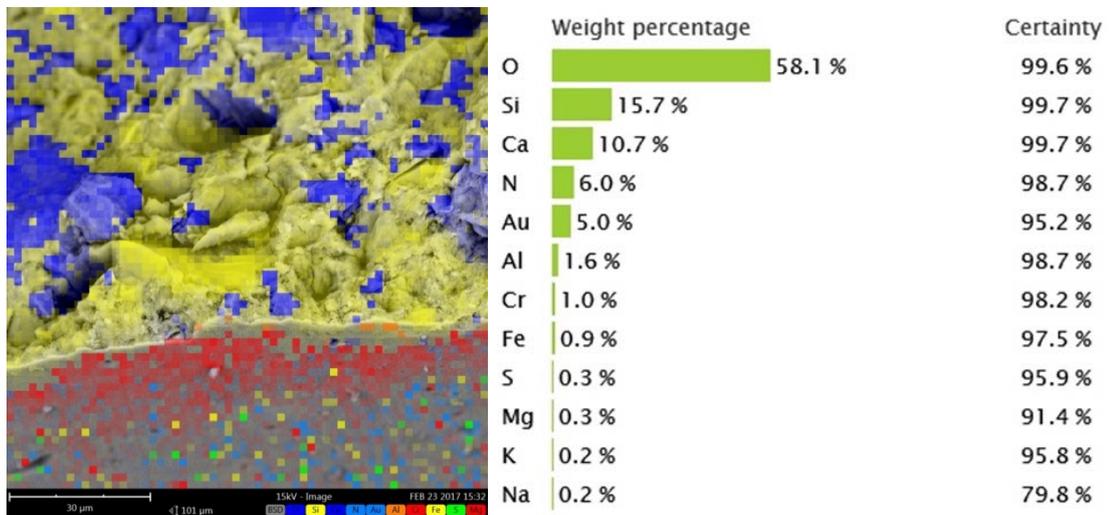


Abbildung 7: Partielle Untersuchung der Probe im Übergangsbereich UHPC/spektralselektive Schicht mittels EDX (links) und detektierte, oberflächennahe Elemente (rechts)

Bei der in Abbildung 7 dargestellten untersuchten Probe wurden keine untypischen Elemente detektiert, welche dem UHPC entstammen.

2.2.3 Spektralselektive Beschichtung zwischen Lackschichten

Die Beschichtung für die Produktfamilie TABSOLAR® *Premium* wurde bereits im ersten Projekt TABSOLAR I erfolgreich entwickelt, auch die TABSOLAR® *Economy* mit durchgefärbtem UHPC oder Solarlackbeschichtung wurde bereits in TABSOLAR I betrachtet. In TABSOLAR II lag der Fokus der Schichtentwicklung daher auf einer spektralselektiven Variante für die Produktfamilie TABSOLAR® *Design*.

Für TABSOLAR® *Design* wird ein Lack gesucht, der die Witterungsbeständigkeit der spektralselektiven Schicht gewährleistet.

Dazu wurden verschiedene Lackhersteller kontaktiert. Zum Überprüfen der Witterungs- und Temperaturbeständigkeit der spektralselektiven Beschichtung auf UHPC wurden zwei verschiedene Lacke ausgewählt. Diese wurden in einer ersten Versuchsreihe als Deckschicht auf die Sputterschicht aufgebracht.

Dazu wurden von G.tecz glatte und raue UHPC-Substrate bereitgestellt. Diese wurden am Fraunhofer ISE mit der spektralselektiven Beschichtung besputtert und anschließend mit

den zwei verschiedenen Lacken beschichtet. Der Lack wurde aufgeschleudert (Spin Coating).

Zum Vergleich wurden auch nicht zusätzlich lackierte UHPC-Proben sowie Glassubstrate untersucht.

Die Proben wurden im Klimaschrank für zwei Tage bei 85 °C und 85 % relativer Feuchte bewittert, danach im Fourier-Spektrometer vermessen und anschließend für weitere 10 Tage im Klimaschrank bewittert. Weitere Proben wurden im Ofen bei 160 °C für 500 h gealtert.

Es zeigte sich, dass auf dem glatten UHPC die Beständigkeit der Probe ohne zusätzliche Lackschicht nach dem Klimaschranktest nicht gegeben ist (Abbildung 8 und Abbildung 11), die Beständigkeit im Ofen ist dagegen gut (Abbildung 12). Mit einer zusätzlichen Lackschicht steigt die Beständigkeit im Klimaschrank stark an (Abbildung 9, Abbildung 10, Abbildung 13, Abbildung 15). Nach dem Test im Ofen sind die Spektren zwar verändert, dies liegt aber wahrscheinlich in Veränderungsprozessen im Lack begründet und ist keine Degradation (Abbildung 14), da die IR-Reflexion nach dem ersten Alterungsschritt konstant bleibt. Lack 2 zeigt starke Banden im IR (Abbildung 16), da die Schichtdicke durch eine hohe Viskosität deutlich höher war als bei Lack 1. Man kann zudem erkennen, dass durch den Ofentest Bestandteile ausdünsten, da die IR-Banden mit jedem Alterungsschritt geringer werden. Die Proben zeigen mit Lack 2 ein silbriges Aussehen, was auch in der Lackdicke begründet liegt. Lack 1 ist dagegen sehr dünn, da er die IR-Reflexion im Vergleich zur unlackierten Probe kaum verringert. Trotzdem zeigt er eine stark verbesserte Korrosionsbeständigkeit im Klimaschrank.

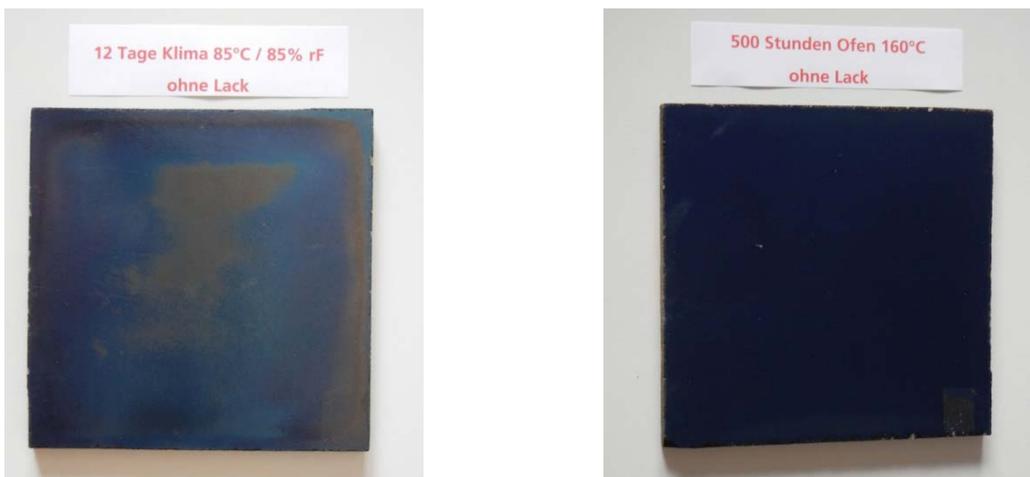


Abbildung 8: Foto der glatten Betonproben ohne zusätzlichen Lack; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen

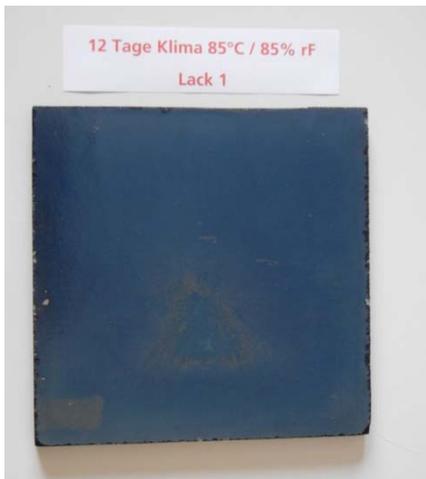


Abbildung 9: Foto der glatten Betonproben mit Lack 1; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen

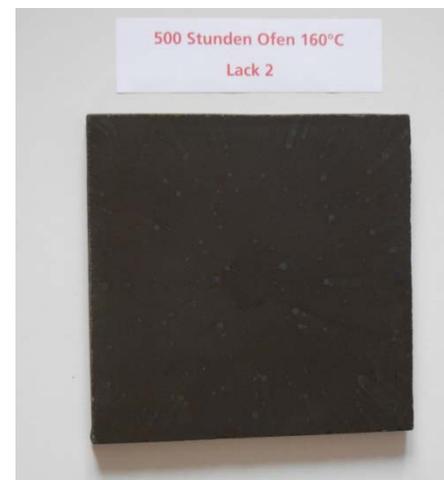


Abbildung 10: Foto der glatten Betonproben mit Lack 2; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen

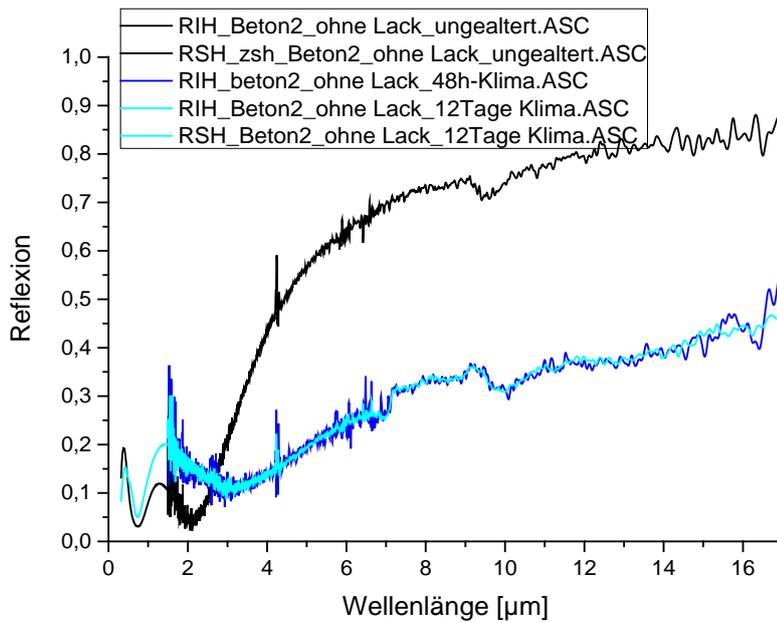


Abbildung 11: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten UHPC (glatt) ohne zusätzliche Lackschicht nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

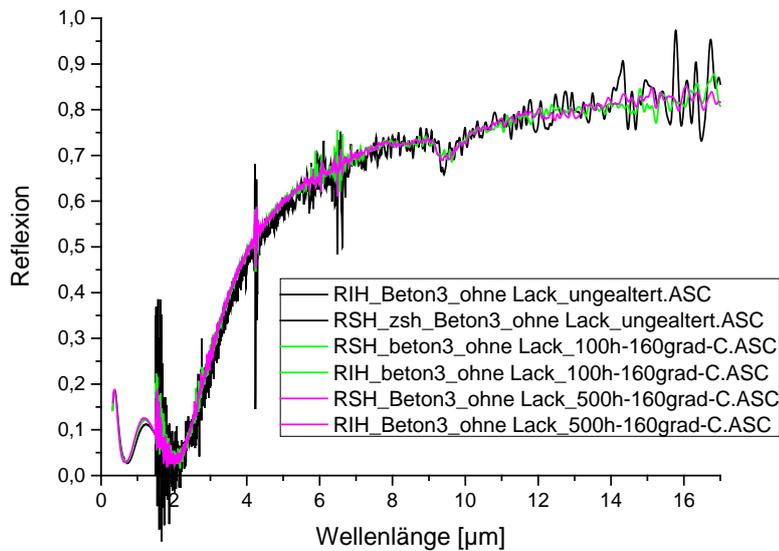


Abbildung 12: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten UHPC (glatt) ohne zusätzliche Lackschicht nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C

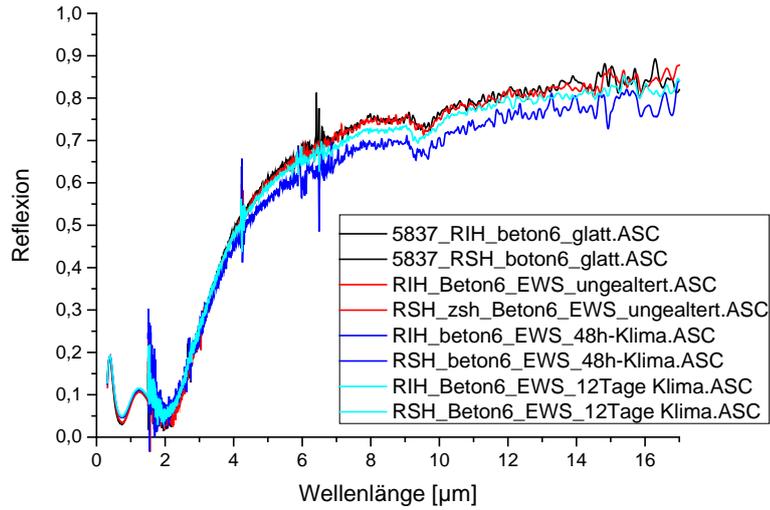


Abbildung 13: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 1 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

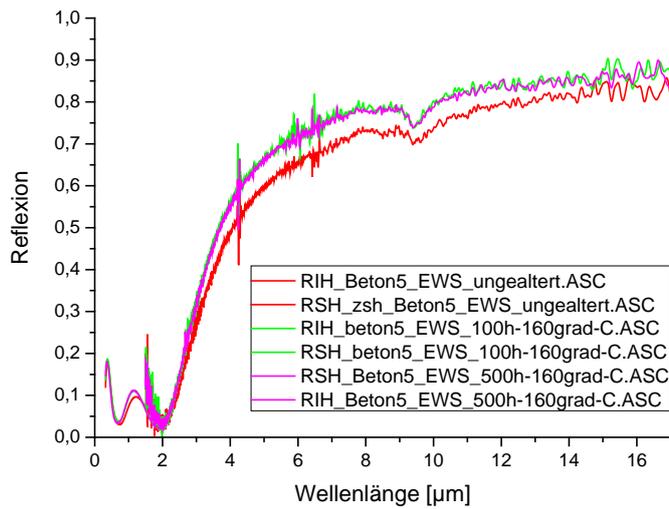


Abbildung 14: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 1 nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C

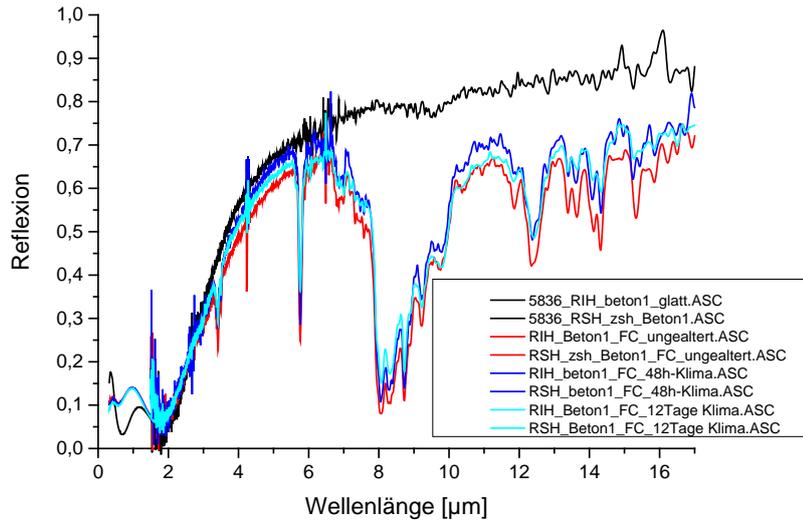


Abbildung 15: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 2 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

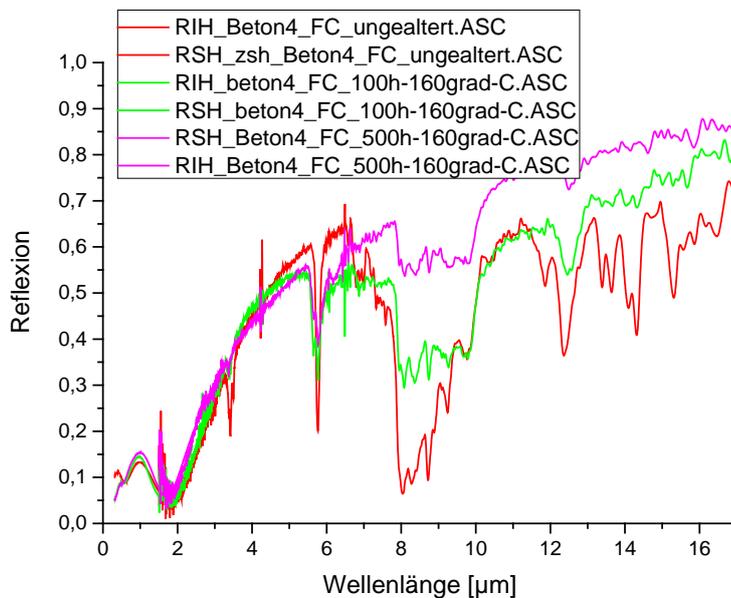


Abbildung 16: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 2 nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C

Auf den rauen Substraten ist die IR-Reflexion durch die raue Oberfläche so niedrig, dass die Spektralselektivität der Schichten nur noch sehr gering ist. Zudem ist die Schutzwirkung gegen Feuchte nicht mehr gegeben, wahrscheinlich, weil der Lack auf der rauen Oberfläche keine geschlossene Schicht ausbildet, siehe Abbildung 17 und Abbildung 18. Im Ofen dagegen ist keine Degradation zu sehen, siehe Abbildung 19. Es zeigen sich auf

den Proben allerdings dunklere »Rahmen« (Abbildung 17), deren Ursache noch ungeklärt ist.

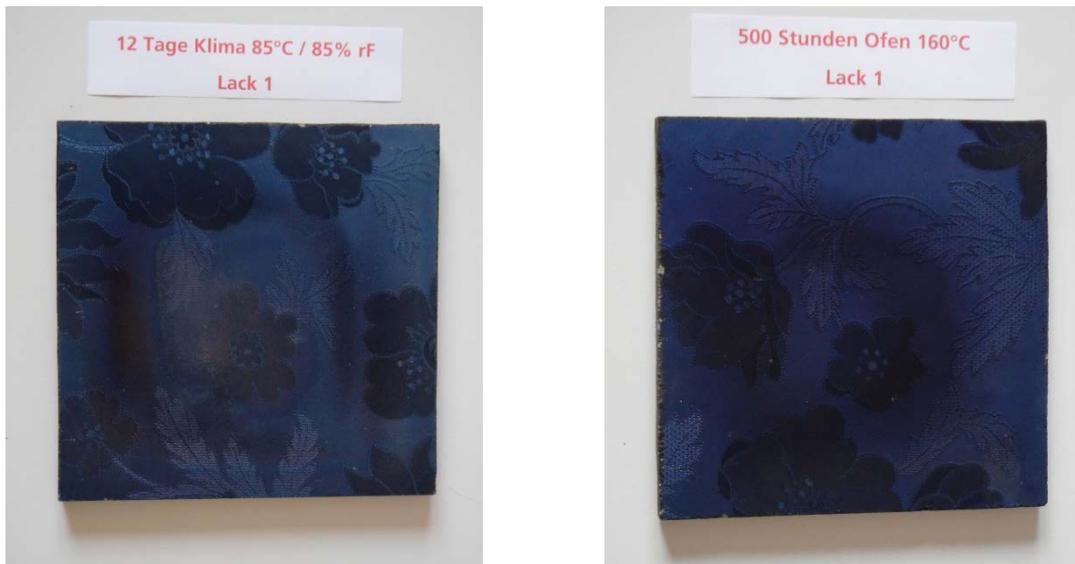


Abbildung 17: Foto der rauen Betonproben mit Lack 1; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen

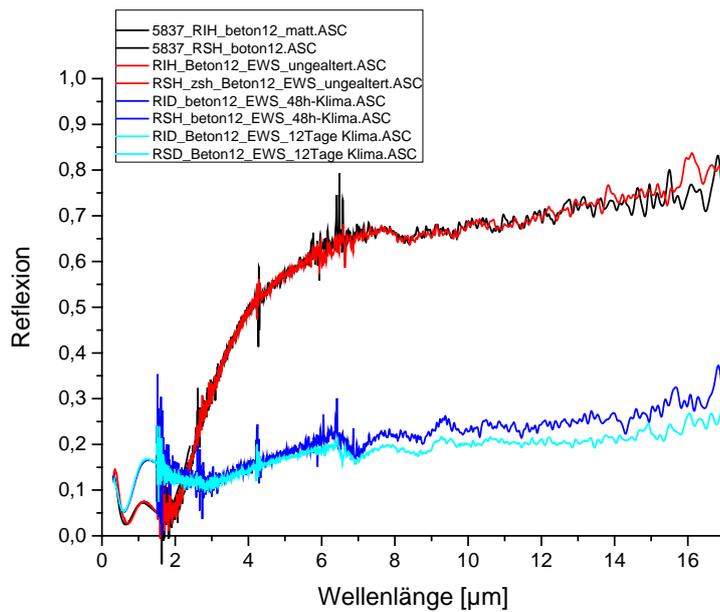


Abbildung 18: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (rau) mit Lack 1 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

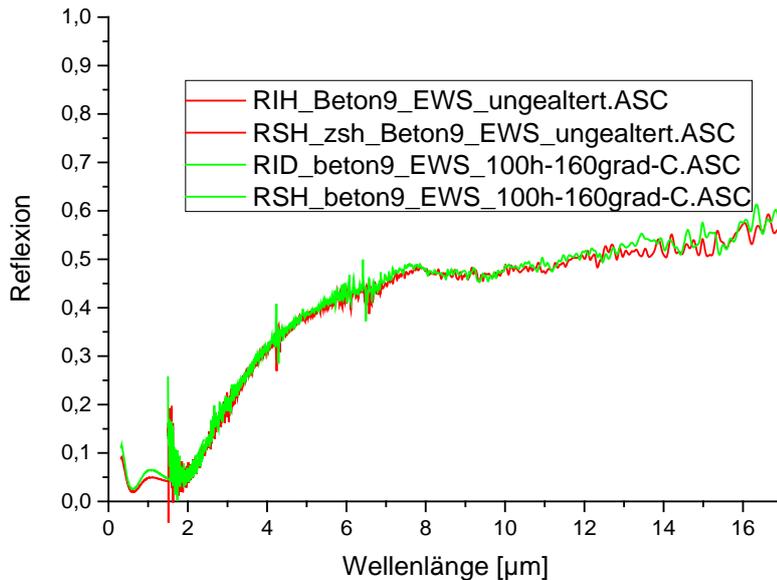


Abbildung 19: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten UHPC (rau) mit Lack 2 nach 100 h Alterung im Ofen bei 160 °C

Beim Vergleich mit den Proben auf Glas zeigt sich jedoch, dass die spektralselektive Schicht auf Glas auch ohne Schutzlack im Klimaschrank für 12 Tage beständig ist (Abbildung 20). Auch im Ofen ist die Schicht stabil (Abbildung 21). Zudem ist die IR-Reflexion auf Glas natürlich höher als auf UHPC.

Das bedeutet, dass die Degradation der spektralselektiven Beschichtung nach Belastung im Klimaschrank ohne Schutzlack nur in Kombination mit UHPC auftritt. Mit einem Schutzlack ist die Beständigkeit jedoch deutlich erhöht. In einer weiteren Versuchsreihe sollte der Lack nun auch unter der spektralselektiven Beschichtung aufgebracht werden, um zu sehen, ob damit noch bessere Ergebnisse erreicht werden können. Zudem wurde vermutet, dass sich eine glattere Oberfläche unter der spektralselektiven Schicht auch positiv auf die IR-Reflexion und damit auf die Emission der Proben auswirken könnte.

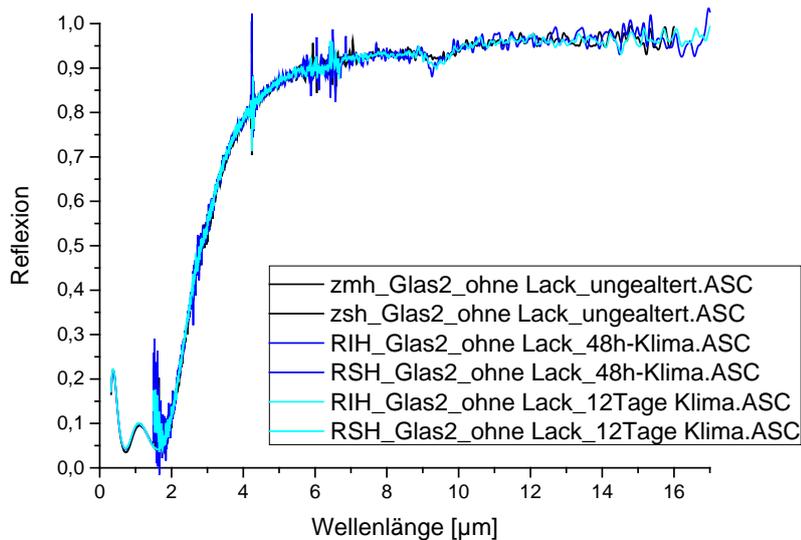


Abbildung 20: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten Glases ohne zusätzliche Lackschicht nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

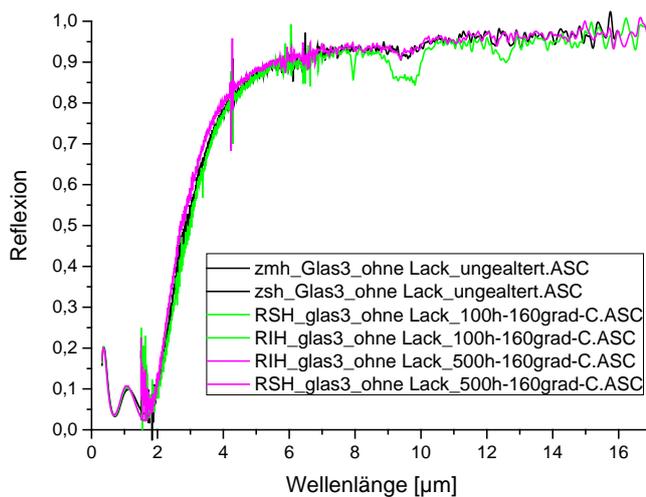


Abbildung 21: Reflexionsspektren des spektralsektiv beschichteten Glases ohne zusätzliche Lackschicht nach 100 h Alterung im Ofen bei 160 °C

Versuchsreihe 2

Ziel der zweiten Versuchsreihe war, herauszufinden, ob ein Lack unter der selektiven Sputterschicht die Stabilität der TABSOLAR®-Design-Absorber erhöhen kann.

Es zeigte sich, dass mit Lack 1, sowohl unter der Absorberschicht als auch zusätzlich über der Absorberschicht aufgebracht, die Stabilität im Klimaschrank stark verbessert ist gegenüber unlackierten Proben, sie jedoch noch nicht ausreicht. Der Lack ist sehr dünn (kei-

ne Absorptionsbanden im IR) und sollte dicker aufgebracht werden. Die Haftung der Proben mit Lack 1 ist nach Belastung gut. Lediglich direkt nach Beschichten finden beim Tape-Test kleinere Ablösungen statt, nach den Belastungstests sind die Proben haftfest.

Lack 2 hatte auf der selektiven Absorberschicht aufgebracht eine sehr gute Stabilität im Klimaschrank gezeigt, die Absorptionsbanden waren aber zu stark, so dass der Emissionsgrad zu hoch und die Selektivität nicht mehr ausreichend gegeben ist. Unter der selektiven Schicht aufgebracht, ist die Stabilität ebenfalls sehr gut, doch aufgrund der hohen Lackdicke bilden sich Risse aus, und die Haftung nach dem Ofentest ist sehr schlecht. Eine Kombination von Lack 2 unter der selektiven Schicht und Lack 1 oben führt ebenfalls zu Rissen nach dem Ofentest. Lack 2 sollte also in geringerer Schichtdicke aufgebracht werden, um die Rissbildung zu vermeiden.

Versuchsreihe 3

In der dritten Versuchsreihe wurde ein anderes Verfahren zur Lackaufbringung getestet: die verschiedenen Lacke wurden nun gesprüht statt aufgeschleudert. Dadurch konnte die Lackdicke verändert werden.

Um eine höhere Lackdicke von Lack 1 zu erreichen, wurde er in einigen Versuchen zweimal hintereinander aufgebracht. Lack 2 wurde im Verhältnis 1:10 verdünnt und aufgesprüht.

Der Absorptionsgrad der selektiven Absorberschicht war durch Umbauten auf der Sputteranlage in diesem Versuch leider sehr niedrig. Die Sputterparameter müssen für den nächsten Versuch erst nachjustiert werden, damit ein hoher solarer Absorptionsgrad gewährleistet ist. Dadurch ergibt sich auch die sehr helle Farbe der Beschichtung, siehe Abbildung 22.

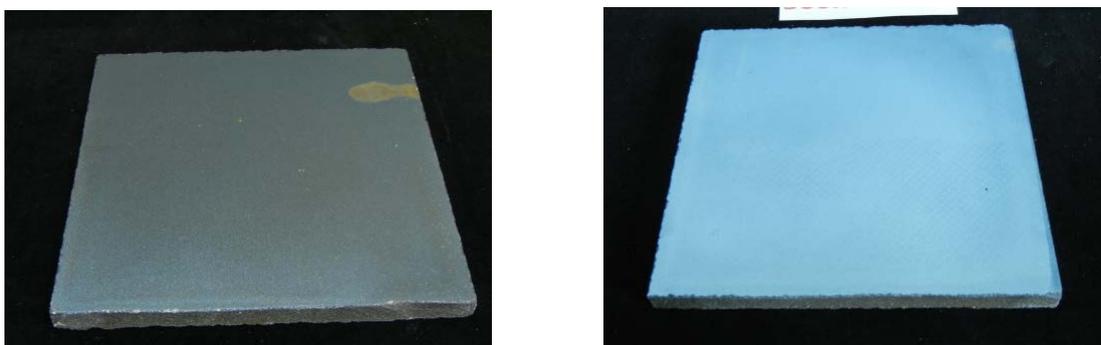


Abbildung 22: Foto von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte (links) und 500 h bei 160 °C im Ofen (rechts)

Aufbau: UHPC – Absorber – Lack X

Die Proben wurden in dieser Versuchsreihe nur im Klimaschrank getestet, da die Beständigkeit im Ofen bisher immer gegeben war. Die Proben wurden nach Alterung im Fourier-Spektrometer vermessen und im Lichtmikroskop begutachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Reflexionsgrad des Absorbers ohne Lack sinkt wie in den bisherigen Versuchen, die der Proben mit Lack 1 und 2 bleibt stabil (Abbildung 23 und Abbildung 24), eine leichte Verschlechterung ist bei Lack 3 zu sehen (Abbildung 25). Auf der Probe mit Lack 3 sind im Lichtmikroskop größere Tropfen zu sehen, die Homogenität der Lackschicht ist bei Lack 3 also schlechter als bei den anderen Lacken. Auch die Schichthftung der Proben ist im Tape-Test nicht gegeben, meist löst sich die Absorberschicht im Tape-Test.

Tabelle 1: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest (und Vergleich mit Probe ohne Lack)

	Beurteilung der Proben im Fourier-Spektrometer	Beurteilung der Proben im Lichtmikroskop	Tape-Test
Abs	R (IR) sinkt, Haftung schlecht	recht homogen	-/-
Abs/2 * Lack 1	stabile optische Werte	homogen	-/-
Abs/Lack 2	stabile optische Werte	geringe Schichtdickenunterschiede	-/o
Abs/Lack 3	leichte Abnahme R(IR)	große Tropfen	o/o

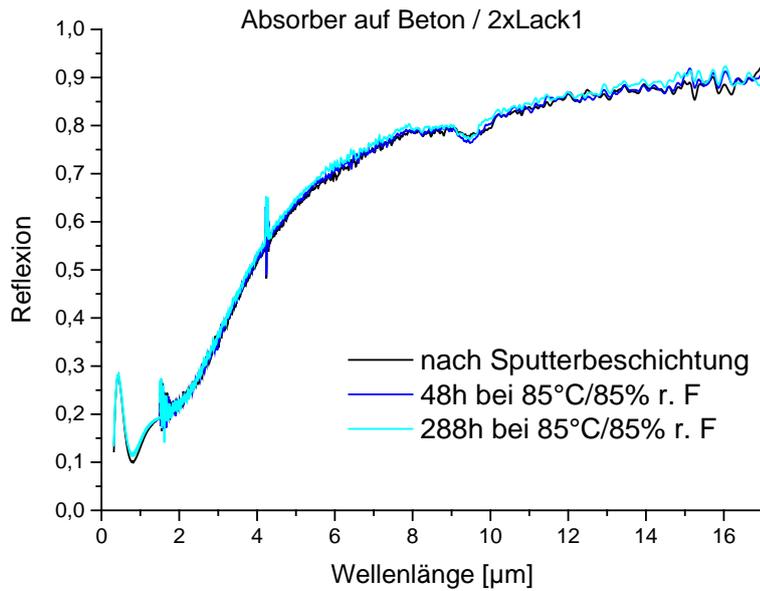


Abbildung 23: Reflexionsspektren von UHPC – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

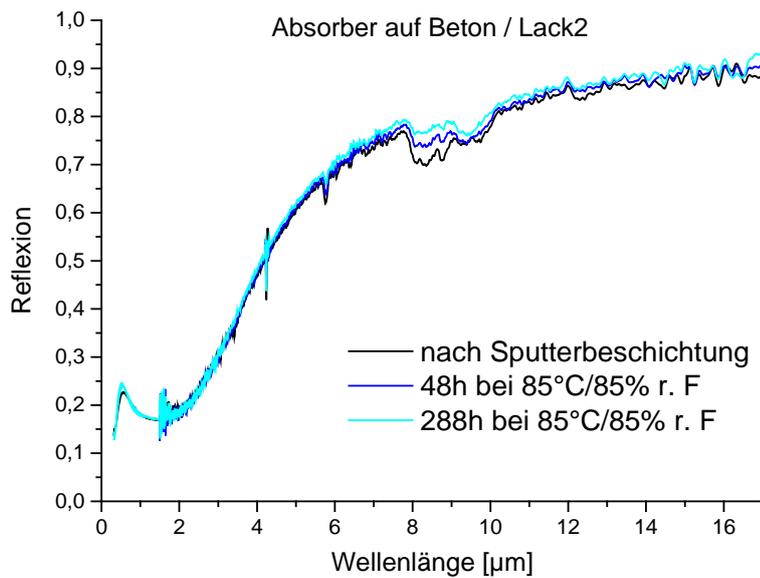


Abbildung 24: Reflexionsspektren von UHPC– Absorber– Lack 2 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

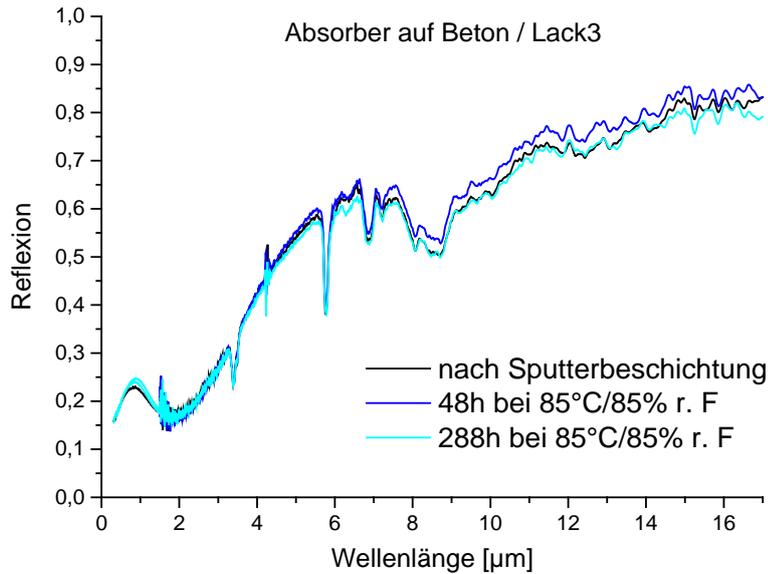


Abbildung 25: Reflexionsspektren von UHPC – Absorber – Lack 3 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

Aufbau: UHPC – Lack 1 – Absorber – Lack X

Mit Lack 1 unter der selektiven Absorberschicht ist die Beständigkeit im Klimaschrank sehr gut (siehe Abbildung 26), und auch die Homogenität der Schichten bei Betrachtung im Lichtmikroskop ist gut (Abbildung 27). Im Tape-Test gibt es nur kleinere Bereiche mit Ablösungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Lack 1 – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest

	Beurteilung der Proben im Fourier-Spektrometer	Beurteilung der Proben im Lichtmikroskop	Tape-Test
Lack 1/Abs/2 * Lack 1	stabile optische Werte	Recht homogen	o/o
2 * Lack1/Abs/ 2 * Lack 1	stabile optische Werte, Absorptionsbande nach 2 Tagen KS	Größere braune Flecken (Tröpfchen)	o/o
Lack 1/Abs/Lack 2	stabile optische Werte, Absorptionsbande verschwindet nach 2 Tagen KS	Geringe Schichtdickenunterschiede	o/o

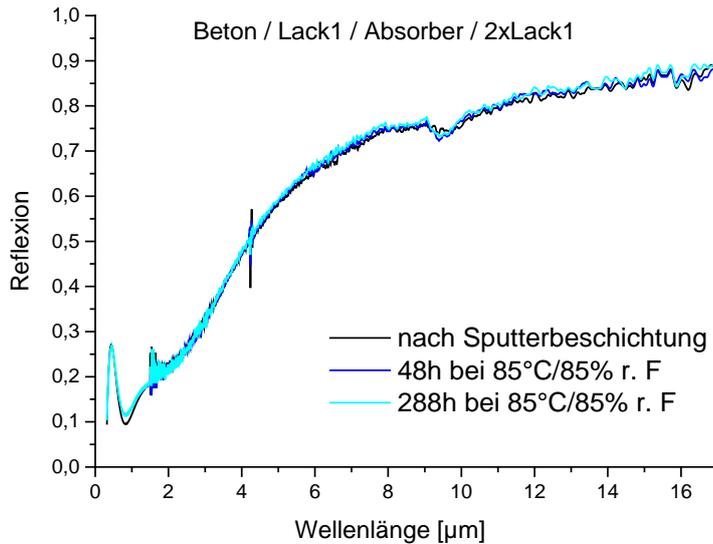


Abbildung 26: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

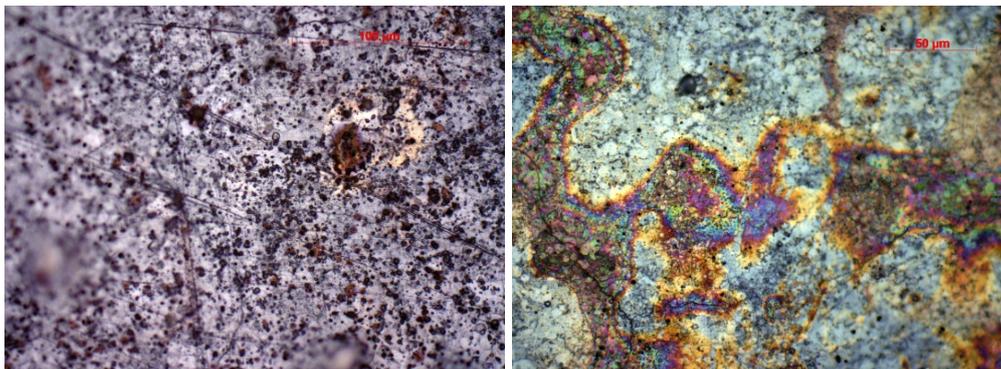


Abbildung 27: Lichtmikroskopaufnahmen nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 50facher Vergrößerung: UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 (links) und UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 2 (rechts)

Aufbau: UHPC – Lack 3 – Absorber – Lack X

Lack 3 unter der selektiven Absorberschicht führt zu einer sehr inhomogenen Beschichtung, wie in den Lichtmikroskop-Aufnahmen in Abbildung 30 zu erkennen ist. Die Beständigkeit im Klimaschrank ist sehr gut, siehe Abbildung 28. Im Tape-Test gibt es wiederum nur kleinere Bereiche mit Ablösungen. Die Proben mit dem neuen Lacksystem 3 wurden zusätzlich im Ofen getestet, auch hier wird eine sehr gute Beständigkeit erreicht, siehe Abbildung 29. Nach Alterung im Ofen bestehen die Proben den Tape-Test.

Der raue (strukturierte) UHPC wird jedoch auch mit Lack 3 nicht ausreichend gegen Korrosion im Klimaschrank geschützt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Lack 3 – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest

	Beurteilung der Proben im Fourier-Spektrometer	Beurteilung der Proben im Lichtmikroskop	Tape-Test
Lack 3/Abs/ Lack 3	stabile optische Werte	Sehr große Schichtdickenunterschiede im Lack	o/o
Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1	stabile optische Werte	Sehr große Schichtdickenunterschiede im Lack	o/o
Lack 3/Abs/ Lack 2	stabile optische Werte	Sehr große Schichtdickenunterschiede im Lack	o/o
Lack 3/Abs/ Lack 3 UHPC: rau	Sinkende R(IR)	Sehr große Strukturen	o/o

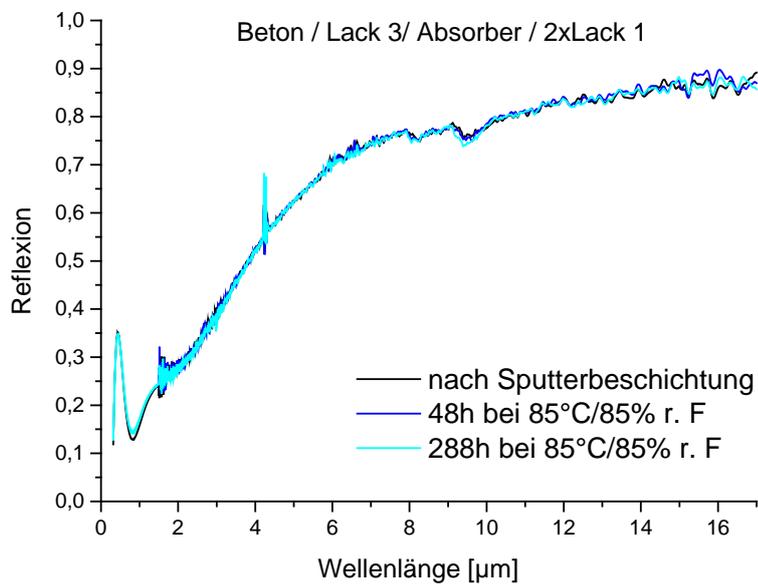


Abbildung 28: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

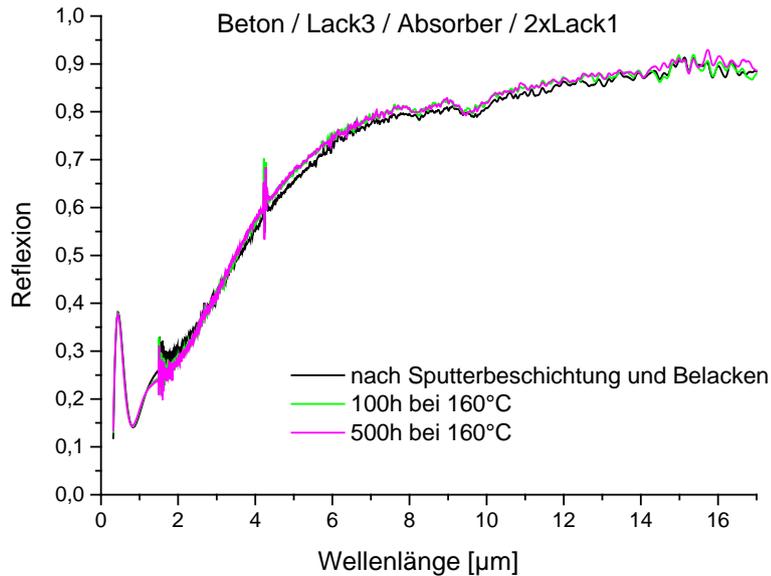


Abbildung 29: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 500 h Alterung bei 160 °C im Ofen

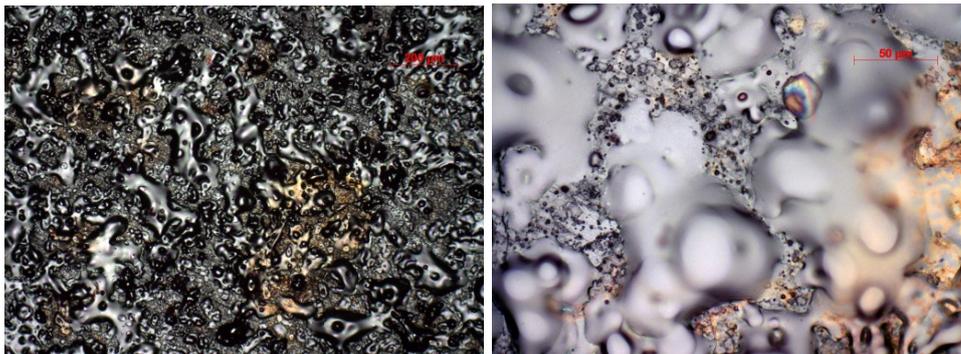


Abbildung 30: Lichtmikroskopaufnahmen von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 10facher (links) und 50facher Vergrößerung (rechts)

Die Ergebnisse der 3. Versuchsreihe sind sehr vielversprechend. Als beste Proben wurden

- UHPC – Lack 1 – Abs – 2 * Lack 1

und

- UHPC – Lack 3 – Abs – 2 * Lack 1

ausgewählt. Die Stabilität im Klimaschrank ist sehr gut, der IR-Reflexionsgrad ist durch den Lack kaum beeinträchtigt. Mit Lack 3 ist die Homogenität der Lackschicht zwar schlechter, dies hat jedoch keinen negativen Einfluss auf die Beständigkeit oder die optischen Eigenschaften.

Versuchsreihe 4

In der 4. Versuchsreihe wurden diese Schichtaufbauten nun nochmals hergestellt: zum einen wurden dabei die Prozessparameter während des Sputterprozesses angepasst, um erneut einen hohen solaren Absorptionsgrad zu erreichen, zum anderen wurden bei Spürgin gefertigte UHPC-Proben im Vergleich mitbeschichtet, um die Oberflächenqualität dieser UHPC-Bauteile zu überprüfen und auf Beständigkeit zu untersuchen.

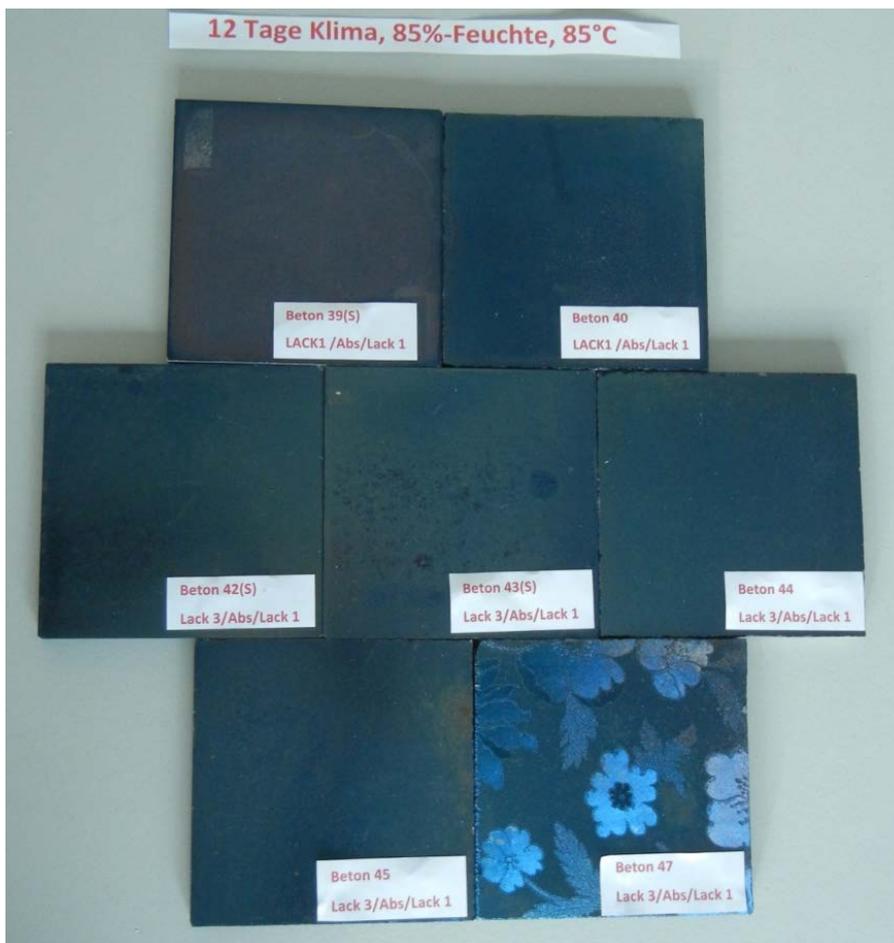


Abbildung 31: Proben der 4. Versuchsreihe nach 12 Tagen Klimaschranktest

UHPC / Lack 1 / Abs / 2 * Lack1

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Versuche mit Lack 1 zwischen UHPC und Absorberschicht dargestellt. Eine Probe stammte dabei wie bisher von G.tecz, eine weitere Probe wurde bei Spürgin gefertigt. Damit sollte untersucht werden, ob die UHPC-Fertigung bei Spürgin zu gleichen Ergebnissen hinsichtlich der Sputterbeschichtung führt wie die bisherigen Versuche mit UHPC von G.tecz. Während die G.tecz-Probe eine nur minimale Degradation nach 12 Tagen Klimaschranktest zeigt, ist jedoch die von Spürgin gefertigte

Probe bereits nach 24 h Test im Klimaschrank bezüglich der optischen Werte zerstört. Der IR-Reflexionsgrad sinkt stark, d. h. der IR-Emissionsgrad steigt stark an, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33. Im Lichtmikroskop sind feine Kristallite zu sehen, es ist jedoch unklar, ob dies zu dem Versagen führt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Proben mit Aufbau Lack 1 – Sputterschicht – 2 * Lack 1 auf UHPC von G.tecz bzw. Spürgin gefertigt nach Klimaschranktest

	Beurteilung der Proben im Fourier-Spektrometer	Beurteilung der Proben im Lichtmikroskop	Tape-Test
UHPC (G.tecz)/ Lack 1/Abs/ 2 * Lack 1	Leichte Degradation nach 12 Tagen	homogen	o/-
UHPC (Spürgin)/ Lack 1/Abs/ 2 * Lack 1	Starke Degradation nach 2 Tagen	Kristallite	-/-

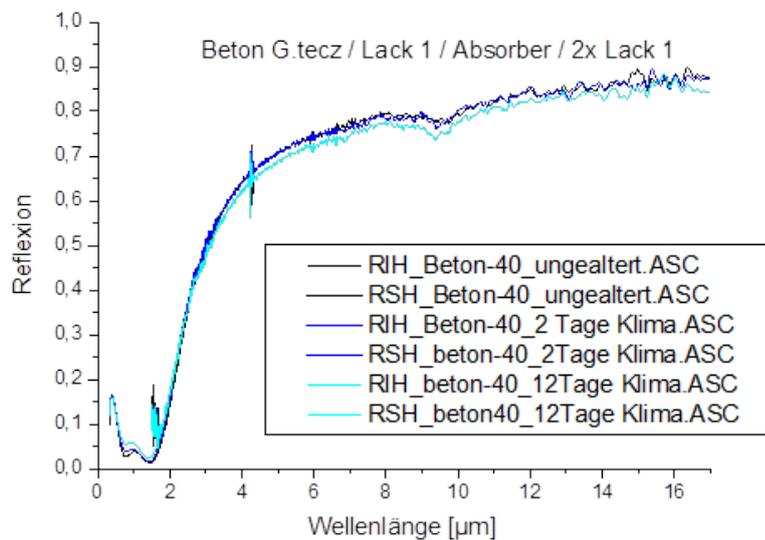


Abbildung 32: Reflexionsspektren von UHPC(G.tecz) – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

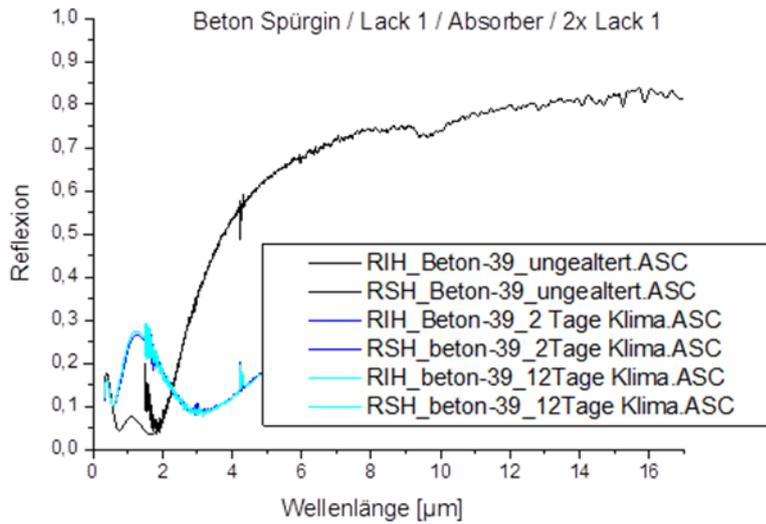


Abbildung 33: Reflexionsspektren von UHPC(Spürgin) – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

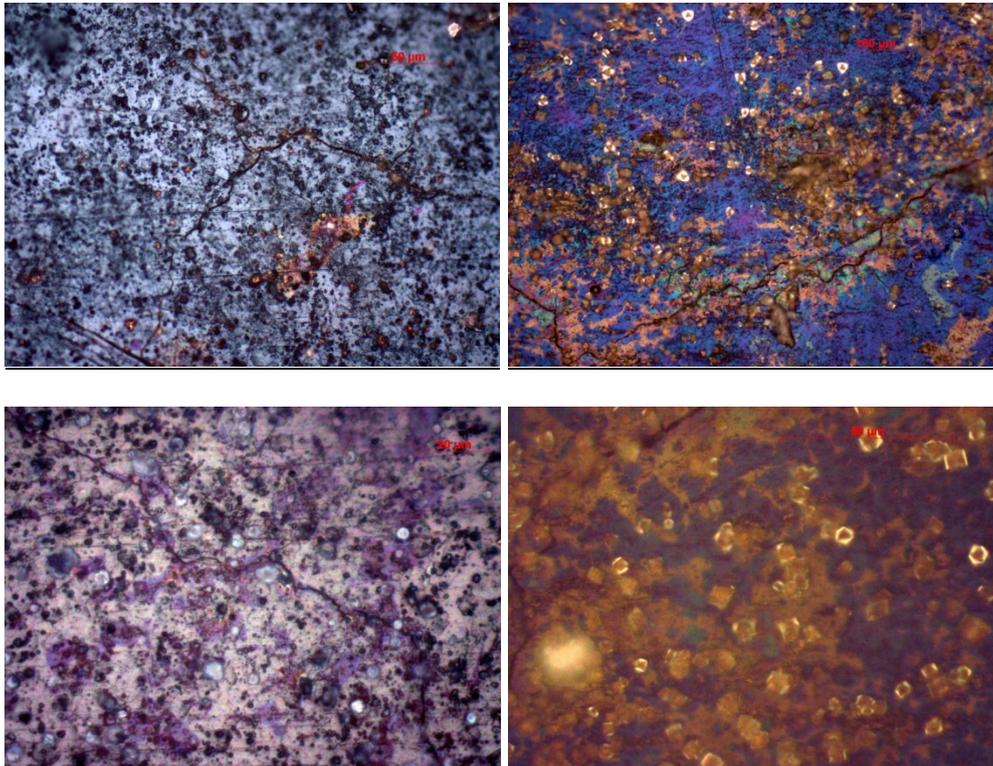


Abbildung 34: Lichtmikroskopaufnahmen von Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 10facher (oben) und 50facher Vergrößerung (unten); links: G.tecz, rechts: Spürgin

UHPC / Lack 3 / Abs / 2 * Lack1

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Versuche mit Lack 3 zwischen UHPC und Absorberschicht dargestellt. Wiederum stammt ein Teil der Proben von G.tecz, die anderen Proben von Spürgin. Zusätzlich wurde eine strukturierte Probe (Blumenmuster, G.tecz) mitbeschichtet. Des Weiteren wurde untersucht, ob eine Trocknung des Lacks (Lack 3; Trocknung 1 h bei 120 °C) vor dem Beschichten in der Sputteranlage einen Einfluss auf die Stabilität zeigt.

Positiv ist, dass mit Lack 3 als Grundlack die Proben von Spürgin nun auch den Test im Klimaschrank ohne Degradation der optischen Werte bestehen, siehe Abbildung 35 und Abbildung 36. Für die Stabilität spielt es dabei keine Rolle, ob der Lack vor dem Sputterprozess getrocknet wurde oder nicht. Jedoch ist der Emissionsgrad der Proben geringer, wenn eine Trocknung erfolgt. Der Emissionsgrad der Spürgin-Probe ist mit 11,7 % (bezogen auf einen Planck-Strahler bei 100 °C) etwas höher als die von G.tecz mit 10,1 %. Der Absorptionsgrad beträgt 87,8 % (AM1,5 global) auf Spürgin-UHPC und 88,1 % auf G.tecz-UHPC. Diese Werte können noch weiter optimiert werden.

Die Homogenität der Lackaufbringung ist noch verbesserungswürdig, wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Ebenso sind im Tape-Test leichte Ablösungen nach dem Klimaschranktests zu beobachten, was jedoch nicht als besonders kritisch eingestuft wird.

Schön ist auch, dass die strukturierte Probe (Blumenmuster, G.tecz) ebenfalls stabile optische Werte nach den Klimaschranktests aufweist.

Tabelle 5: Ergebnisse der Proben mit Aufbau Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 auf UHPC von G.tecz bzw. Spürgin gefertigt nach Klimaschranktest

	Beurteilung der Proben im Fourier-Spektrometer	Beurteilung der Proben im Lichtmikroskop	Tape-Test
UHPC (G.tecz)/ Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1	Stabile optische Werte	Inhomogene Lackauftragung	+/o
UHPC (G.tecz)/ Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1, bei 120 °C getrocknet	Stabile optische Werte	Inhomogene Lackauftragung	+/o
UHPC (Spürgin)/ Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1	Stabile optische Werte	Inhomogene Lackauftragung	+/o
UHPC (Spürgin)/ Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1, bei 120 °C getrocknet	Stabile optische Werte	Inhomogene Lackauftragung	+/o
UHPC (strukturiert)/ Lack 3/Abs/ 2 * Lack 1, bei 120 °C getrocknet	Stabile optische Werte	Inhomogene Lackauftragung	+/o

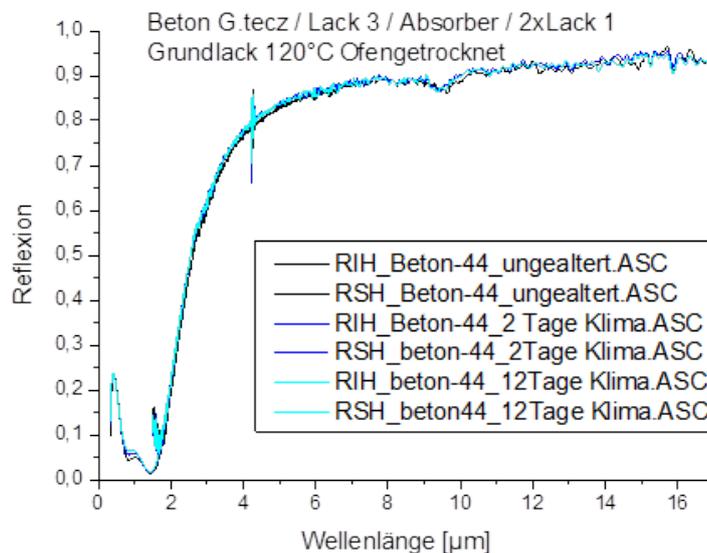


Abbildung 35: Reflexionsspektren von UHPC(G.tecz) – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

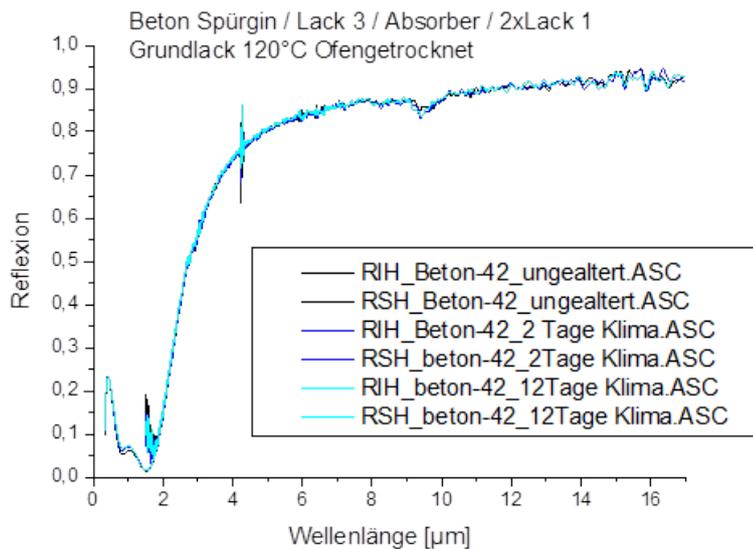


Abbildung 36: Reflexionsspektren von UHPC(Spürgin) – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte

Versuchsreihe 5

In der 5. Versuchsreihe wurde am Fraunhofer ISE der Einfluss verschiedener Schalttafeln während der UHPC-Herstellung auf den Emissionsgrad der Absorberschichten untersucht. Unterschiedliche Schalttafeln haben unterschiedliche Oberflächenqualitäten zur Folge. Die Betonproben wurde von Spürgin gefertigt, anschließend > 28 Tage gelagert und vor dem Beschichten im Ofen getrocknet (Standardprozedur). Zum Vergleich wurden eine G.tecz-Probe (Fertigung 2017) und eine Spürgin-Probe (Anfang 2018) mit in den Versuch aufgenommen. Es wurde der Schichtaufbau UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 verwendet.

Zunächst wurde die Plasmavorbehandlung untersucht. Frühere Versuche hatten gezeigt, dass ein starkes Plasmaätzen (8 Passagen) den Emissionsgrad um ca. 2 % erhöht, weshalb nun getestet wurde, ob die Passagenanzahl reduziert werden kann. Als Kriterium wurde das Bestehen des Tape-Tests nach Beschichtung gewählt. Bereits mit nur einer Passage Plasmaätzen besteht die Probe (Beton 62) den Tape-Test. Deshalb wurden alle folgenden Proben nur mit einer Passage plasmageätzt. Im direkten Vergleich mit der 8x plasmageätzten Probe weist die nur 1x plasmageätzte Probe nun allerdings einen höheren Emissionsgrad auf. Das liegt vermutlich daran, dass die 8x geätzte Probe alleine beschichtet wurde, die 1x geätzte Probe aber mit allen übrigen Proben der 5. Versuchsreihe (14 Proben). Bei 14 Proben ist die Ausgasung deutlich höher, was sich negativ auf den Emissionsgrad auswirkt. Eine ebenfalls nur 1x geätzte Probe, separat beschichtet (jedoch ohne Lack), weist einen deutlich geringeren Emissionsgrad auf (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse der 5. Versuchsreihe

Nr.	Schalttafel	α (AM1,5)	ϵ (100°C)	Beständigkeit Klimaschrank 85 %r.F./85 °C 12 d	Tape-Test nach Beschichten	Tape-Test nach Test
Beton 50	rote Beschichtung, mit Schalöl	93,9	23,0	ja	gut	gut
Beton 51	rote Beschichtung, ohne Schalöl	93,3	8,3	ja	gut	gut
Beton 52	braune Beschichtung, mit Schalöl	93,7	18,4	ja	gut	gut
Beton 53	braune Beschichtung, ohne Schalöl	93,7	9,6	ja	gut	gut
Beton 54	Glas, mit Schalöl	91,1	10,2	ja	gut	gut
Beton 55	Glas, ohne Schalöl	90,8	9,7	ja	gut	gut
Beton 56	Folie weiß, mit Schalöl	90,2	11,0	ja	gut	gut
Beton 57	Folie weiß, ohne Schalöl	91,0	13,4	ja	gut	gut
Beton 58	Acryl transparent, mit Schalöl	90,0	10,3	ja	gut	gut
Beton 59	Acryl transparent, ohne Schalöl	89,6	10,7	ja	gut	gut
Beton 60	Spürgin, Charge 1, 2018	91,1	11,3	ja	gut	gut
Beton 61	G.tecz, 8x ätzen	93,6	7,2	ja	gut	gut
Beton 62	G.tecz, 1x ätzen	92,8	8,7	ja	gut	gut
Beton 6521 (ohne Lack)	G.tecz, 1x ätzen	94,8	6,4	-	gut	---

In Tabelle 6 sind vor allem auch die Ergebnisse der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Schalttafeln zusammengestellt. Die Beständigkeit aller Proben im Klimaschrank (85 °C, 85 % relative Feuchte, 12 d) ist gut, ebenso die Haftung vor und nach dem Test.

Die Emissionsgrade der Proben zeigen deutliche Unterschiede. Der niedrigste Emissionsgrad wird mit der roten Beschichtung ohne Schalöl erzielt: 8,3 % gegenüber 8,7 % für die in derselben Charge mitbeschichtete Probe von G.tecz. Die Verwendung einer Schalttafel mit roter Beschichtung bedeutet also auch eine Verbesserung gegenüber der älteren Probe von G.tecz (11,3 %).

Die Betonoberfläche der Proben ist teilweise recht inhomogen, Löcher und Farbunterschiede sind auf den Proben zu finden, wie in Abbildung 37 zu sehen ist. Diese Unterschiede sind auch noch auf den beschichteten Proben zu erkennen, siehe Abbildung 38 (beispielsweise Beton 56 und Beton 58). Zusätzlich ist in diesem Versuch die Lackaufbringung teilweise sehr dick, was zu zusätzlicher Inhomogenität führt.

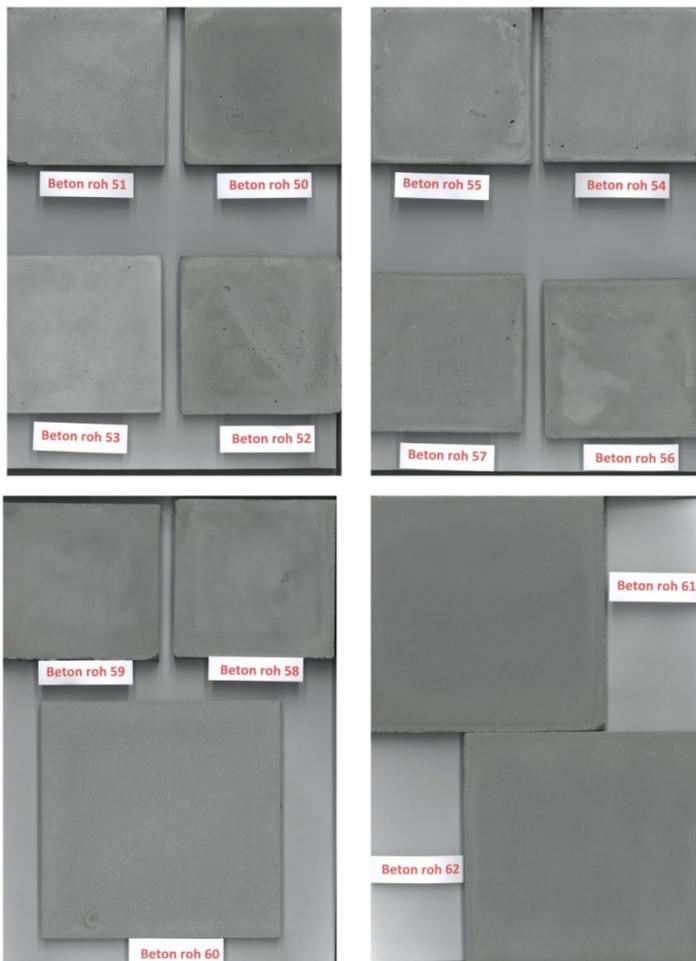


Abbildung 37: Mit unterschiedlichen Schaltafeln hergestellte, unbeschichtete Betonproben

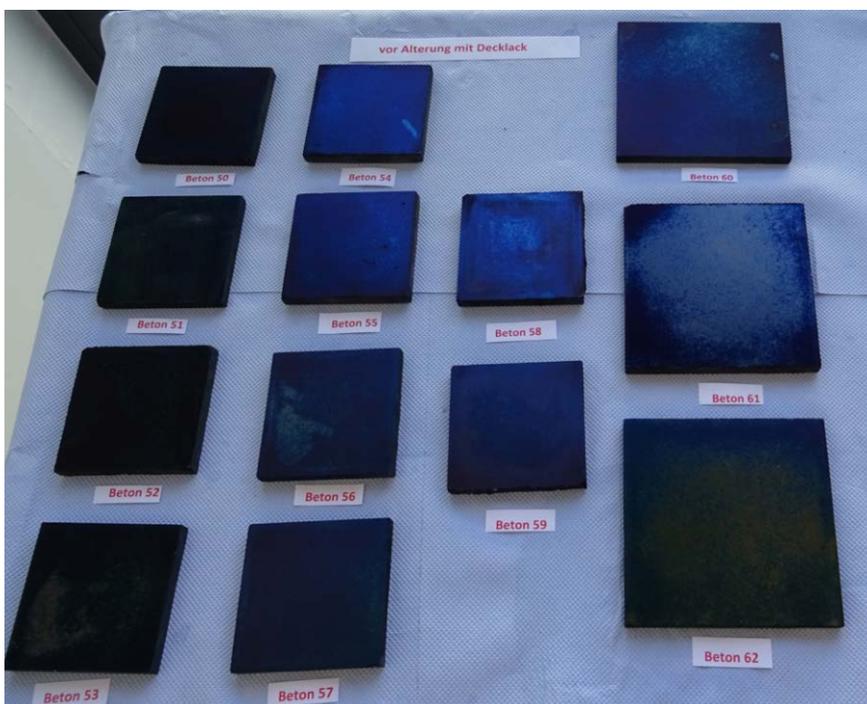


Abbildung 38: Mit unterschiedlichen Schaltafeln hergestellte, beschichtete Betonproben

In einem weiteren Versuch, siehe Abbildung 39, wurde die Beständigkeit gegenüber UV betrachtet. Die Proben wurden der UV-Strahlung (7fach gegenüber AM 1,5) 21 Tage lang ausgesetzt. Anschließend wurden sie 2 Tage im Klimaschrank bewittert (85 °C, 85 % relative Feuchte). Es ist keine Degradation zu erkennen. Die Inhomogenität der Probe ist durch inhomogene Belackung bedingt.

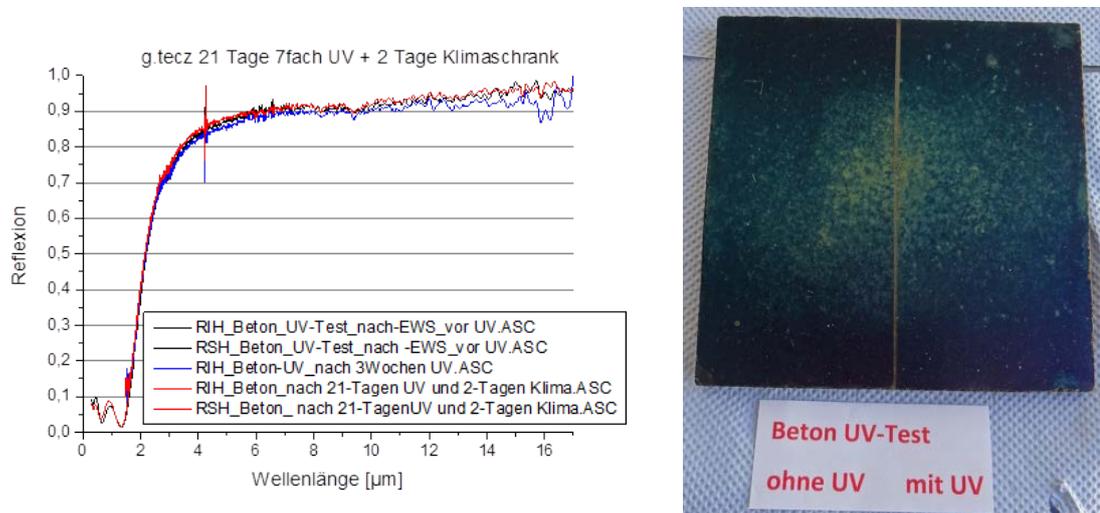


Abbildung 39: Untersuchung der UV-Beständigkeit des TABSOLAR®-Design-Absorbers: Reflexionsspektren vor bzw. nach UV-Test und Klimaschranktest sowie Foto des Absorbers (rechts: mit UV bestrahlte Seite)

2.2.4 Beschichtung von Messexponaten

Für die Messe BAU 2017 wurden kleine Handmuster spektralsektiv beschicht (siehe 2.4.7). Für die Messe BAU 2019 wurden die bei Spürgin gefertigten TABSOLAR®-Elemente und UHPC-Platten ohne Kanäle für das Exponat der Produktfamilie TABSOLAR® *Premium* am Fraunhofer ISE getrocknet und spektralsektiv beschichtet. Da die Betonteile sehr frisch hergestellt wurden, war keine Zeit mehr, um sie 28 Tage zu lagern. Um den Beton abzubinden, wurde er im Ofen getrocknet, zunächst für 48 h bei 85 °C und anschließend 17 h bei 120 °C wie standardmäßig vor der spektralsektiven Beschichtung.

Mittels kleiner Betonmuster wurden anschließend die optischen Eigenschaften der Schicht auf der Sputteranlage eingestellt. Während der Beschichtung der großen TABSOLAR®-Elemente und UHPC-Platten wurden kleine Betonmuster mitbeschichtet und der Absorptionsgrad gemessen. Der Absorptionsgrad (AM 1,5 global) lag dabei zwischen 95,9 % und 96,3 %, mit einem Ausreißer bei 93,5 %. Der Emissionsgrad wurde nur an einer Probe gemessen und lag bei 15,5 % (bei einem Absorptionsgrad von 96,3 %).

Abbildung 40 zeigt die TABSOLAR-Elemente vor und nach der Beschichtung.

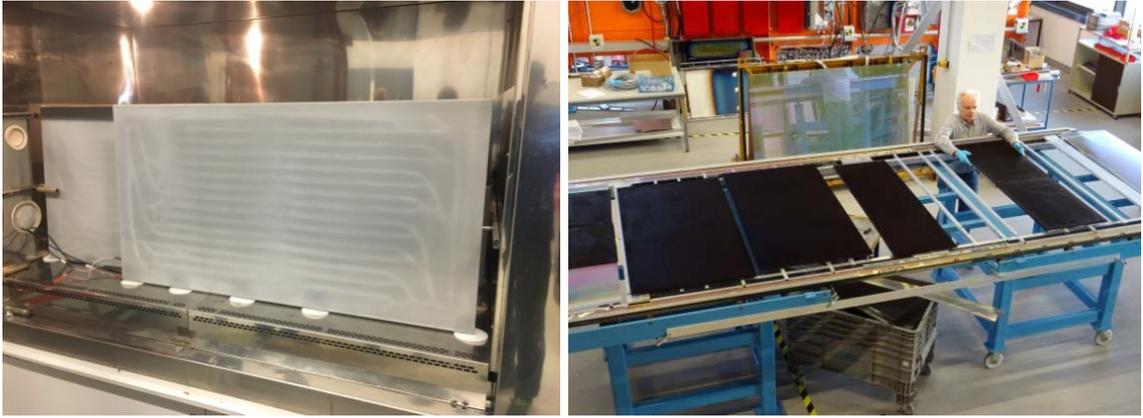


Abbildung 40: TABSOLAR®-Premium-Absorber nach dem Trocknungsprozess im Ofen und nach spektralselektiver PVD-Beschichtung

2.3 Arbeitspaket 3: Ausarbeitung eines Konzepts zur Herstellung langzeitbeständiger durchströmbarer Bauteile aus UHPC inklusive hydraulischer Anschluss technik

2.3.1 Zusammenfassung

Um eine Dampfdiffusion des Wärmeträgermediums durch die Kanalstrukturen zu vermeiden, wurden mehrere filmbildende Stoffe zur Auskleidung der Kanäle untersucht. Aus derzeitiger Sicht scheinen Gießsilikone anwendbar zu sein. Als Alternative zur Auskleidung der Kanäle wird eine Drainback-Solaranlage mit reinem Wasser als Wärmeträgermedium vorgeschlagen.

Für die Hydraulikanschlüsse wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und geprüft. Dazu wurden Muster mittels 3D-Druck aus unterschiedlichen Polymermaterialien hergestellt. Die Hydraulikanschlüsse nach dem schließlich bevorzugten Konzept weisen eine konische Form mit einer Manteldichtung auf und werden über eine Verschraubung mittels Gewindestiften, die über Siebdübel mit dem UHPC verbunden sind, axial verspannt.

Es wurden verschiedene strukturmechanische Untersuchungen durchgeführt. So wurde die Biegezugfestigkeit der Verbindungsflächen des TABSOLAR®-Elements experimentell ermittelt, und die maximale Druckbeständigkeit von Sammelkanälen wurde durch FEM-Analysen und Zugversuche bestimmt. Darüber hinaus wurden Aspekte der Materialverdrängung beim Fügeprozess betrachtet. Durch Thermoschocktests sollte herausgefunden werden, wie TABSOLAR®-Elemente auf plötzliche Temperaturwechsel reagieren.

Für die Befestigung von TABSOLAR®-Elementen als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) sind übliche Agraffen vorgesehen. Es wurde ein Konzept für die Hydraulikverbindung von TABSOLAR®-Elementen beim Einhängen in die VHF-Unterkonstruktion vorgeschlagen.

2.3.2 Diffusionsdichte Kanäle

Gefügedichtigkeit/Permeabilität

Am Fraunhofer ISE wurden Messungen hinsichtlich der Permeabilität des tiefgezogenen UHPC durchgeführt. Anhand der Messergebnisse ist es nötig, die inneren Betonoberflächen der Kanalstrukturen mit einer diffusionsdichten Schicht zu benetzen, wenn man eine

(Teil-)Diffusion des Wärmeträgermediums vermeiden möchte. Dazu wurden erhärtete Betonproben mit einer Vielzahl an filmbildenden Stoffen beschichtet.

Zunächst vielversprechend waren Ergebnisse, welche mit einer Wasserglasbeschichtung erzielt wurden. Die erzeugten Schichten waren zu Beginn dicht. Nach einer nötigen Wärmebehandlung der Betonplatten wiesen die applizierten Schichten aus Wasserglas jedoch eine übermäßige Rissbildung auf. Aufgrund der Rissbildung dieser Wasserglasschichten kann keine dauerhafte Sperrschicht auf den Innenflächen der Kanalstrukturen erzeugt werden.

Abbildung 41 zeigt beispielhaft beschichtete und untersuchte Betonproben mit Rissen in der Wasserglasschicht.

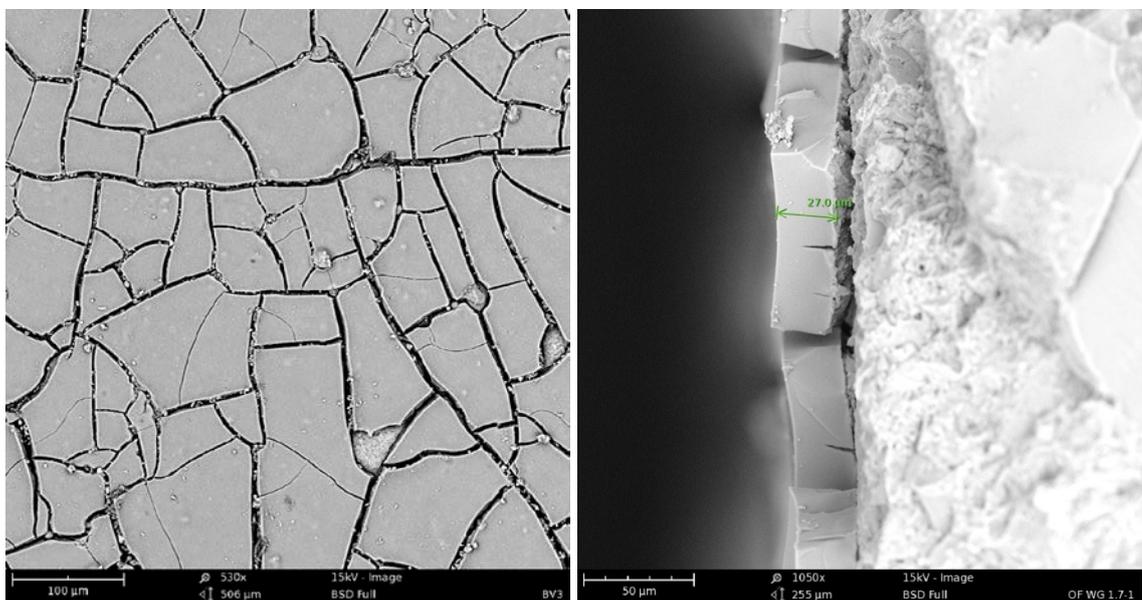


Abbildung 41: REM-Aufnahmen von Wasserglasbeschichtungen; links: Oberfläche (Probe BV3, Beschichtung LI22 mod., Bildhöhe 506 µm); rechts: Querschnitt einer beschichteten Probe (Probe 1,7, Bildhöhe 255 µm)

Durch die Optimierung des eingesetzten Wasserglases konnte die Rissbildung reduziert, aber nicht verhindert werden. Anhand der Versuchsergebnisse erscheint eine Beschichtung der Betonoberflächen mit Wasserglas als ungeeignet. Alternativ wurden weitere Stoffe untersucht.

Abdichten der Kanalstruktur

Wie zuvor beschrieben konnte mit der Applikation eines Wasserglases auf eine erhärtete Betonoberfläche keine dauerhaft abdichtende Schicht erzeugt werden.

Alternativ wurden dazu Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Kanalstrukturen mit zweikomponentigen Polyurethanen und Silikonem verfüllt wurden.

Mit den bei Raumtemperatur nachbehandelten Proben konnte eine adäquate Benetzung und Abdichtung der Kanalstrukturen erzeugt werden.

Da die TABSOLAR®-Elemente und somit die Innenauskleidung der Kanalstrukturen während des Betriebs erhöhten Temperaturbelastungen ausgesetzt sind, wurden die beschichteten Proben bei 220 °C wärmebehandelt. Infolge des Temperatureinflusses wurden die Strukturen/Verbindungen der untersuchten Polyurethane zerstört. Somit ist keine Abdichtung der Kanalstrukturen und Haftverbund zum Beton gegeben. Aus diesem Grund sind die untersuchten Polyurethane nicht für die weiteren Untersuchungen geeignet.

Die untersuchten Gießsilikone hingegen sind resistenter gegen höhere Temperaturbeanspruchungen und bleiben weitestgehend stabil.

Zur Untersuchung der Resttragfähigkeit wurden Probekörper aus Beton hergestellt. Nachdem Erhärten wurden die Probekörper mittels der zu untersuchenden Polyurethane und Gießsilikone stirnseitig miteinander »verklebt« (Abbildung 42 links).

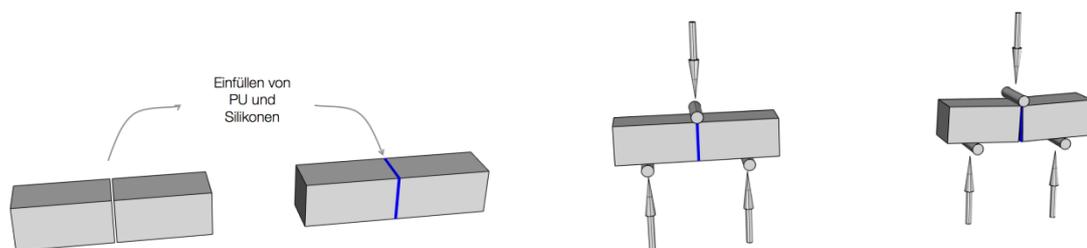


Abbildung 42: Verguss von Probekörpern mit Polyurethan (PU) und Silikon (links); Prüfschema, 3-Punkt-Biegezugversuch (rechts)

Nach Abschluss des Aushärtprozesses der Polyurethane und Silikonem wurde zunächst der Haftverbund zwischen den Betonkörperhälften und den Vergussmaterialien mit Hilfe einer Biegezugprüfung an bei 20 °C gelagerten Proben untersucht. Abbildung 42 rechts stellt das Prüfschema dar.

Anschließend wurde der Versuch mit 220 °C wärmebehandelten Probekörpern wiederholt. Aufgrund des Zerfalls des Polyurethans der bei 220 °C nachbehandelten Proben konnte keine Resttragfähigkeit ermittelt werden. Die mit Gießsilikonem vergossenen Proben weisen auch nach der Wärmebehandlung eine Resttragfähigkeit auf. Im Vergleich der untersuchten und mit Silikonem vergossenen Proben sinkt die gemessene aufnehmbare Biegezugspannung auf 57 bis 28 % des Referenzwerts ab.

Abbildung 43 stellt untersuchte Proben mit und ohne Wärmebehandlung dar. Wie zu erkennen ist wurden die Beschichtung aus Polyurethan (Ebalta VP GM 15 S70 und KauPo Vytraflex 30) weitestgehend zerstört.

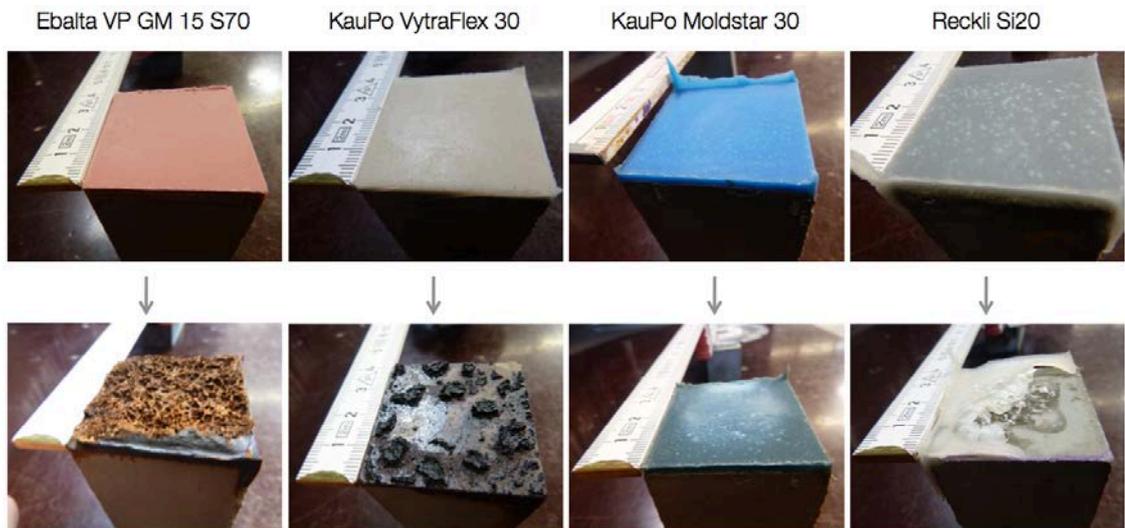


Abbildung 43: Proben mit unterschiedlicher Beschichtung und Nachbehandlung

Ausnahme ist die Verwendung von Gießsilikonen, welche auch nach einer Temperaturbehandlung von 220 °C eine stabile Struktur aufweisen. Infolge der Wärmebehandlung ist ein reduzierter Haftverbund zwischen Silikon und Betonoberfläche zu dokumentieren.

Aus derzeitiger Sicht scheinen Gießsilikone anwendbar zu sein.

Neben der Abdichtung von Kanalstrukturen bildet eine innere Auskleidung einen mechanisch günstigen Kanalquerschnitt aus, da produktionsbedingte Zwickelstellen mit dem Auskleidungsmaterial aufgefüllt werden (Abbildung 44).



Abbildung 44: Kanalstruktur ohne und mit Auskleidung der Oberfläche und Zwickelstellen

Hierbei stellte sich heraus, dass die Intensität der Ausrundung der Zwickelstellen von der Fließgrenze bzw. Viskosität des verwendeten Vergussmaterials abhängt. Bei ansteigender Fließgrenze nimmt der Grad der Ausrundung der Kanalstruktur zu und nähert sich einem idealen Kreisquerschnitt an. Bei überhöhter Fließgrenze besteht die Gefahr, dass sich das Material nicht mehr in die Kanalstrukturen einbringen lässt und/oder die Kanäle komplett verschlossen sind, welches ein Durchströmen des Kanals verhindert. Das untersuchte Verhalten ist in Abbildung 45 und Abbildung 46 beispielhaft dargestellt.

Für die Auskleidung der Kanalstrukturen ist auf eine geeignete Fließgrenze und Viskosität eines entsprechenden Gießsilikons zu achten.

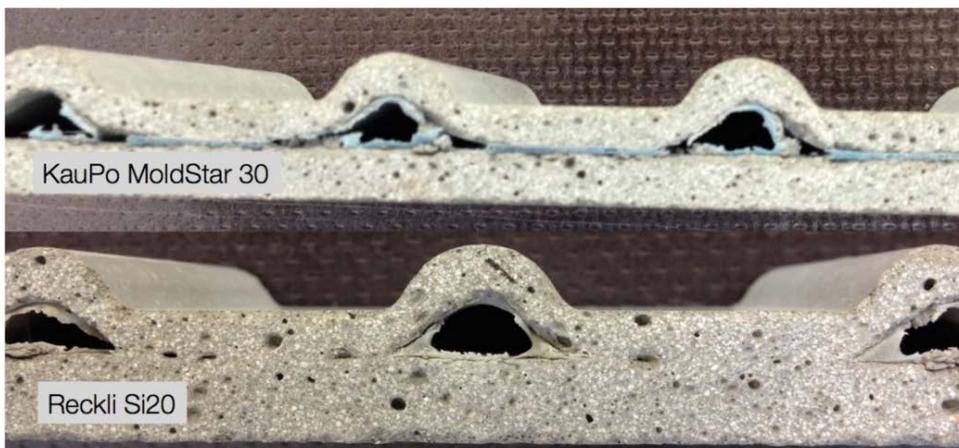


Abbildung 45: Auskleidung der Kanaloberfläche sowie Ausfüllen der Zwickelstellen



Abbildung 46: Überfüllung der Zwickelstellen – Verkleinerung des Querschnitts

Als Alternative zur Auskleidung der Kanäle wurde die Verwendung von reinem Wasser als Wärmeträgermedium diskutiert. In geschlossenen Kollektorkreisläufen ist dies aufgrund der Frostgefahr nicht möglich, jedoch in Drainback-Solaranlagen, bei denen das Wärmeträgermedium in einen Vorratsbehälter zurückfließt, sobald die Pumpe ausgeschaltet wird oder ausfällt. Somit lassen sich Frost- und Stagnationssituationen regelungstechnisch vermeiden. In dem geplanten Folgeprojekt TABSOLAR III soll dieser Ansatz untersucht werden. Sollte Wasser diffundieren, kann es nach einer geeigneten Aufbereitung aus dem Hauswassernetz nachgeliefert werden.

2.3.3 Sammelkanäle und Hydraulikanschlüsse

Für die spezifische Ausarbeitung der Anschlusssituation und die Einbettung von Anschlusselementen im TABSOLAR®-Element ist die Führung der Vor- und Rücklaufleitungen ein entscheidender Faktor. Diese können vertikal oder horizontal angeordnet werden. Die Vor- und Rücklaufleitungen können mit einer entsprechenden Verkleidung abgedeckt werden, die als Revisionsöffnung dient.

Im Hinblick auf die hydraulische Verbindung von TABSOLAR®-Elementen ist zu berücksichtigen, dass ein seitliches Zusammenschieben mehrerer Elemente nicht in jedem Fall möglich ist. Vielmehr sollen die TABSOLAR-Elemente von vorn an der Fassade montiert und anschließend miteinander verbunden werden können.

Um Anschlussbauteile bei der Fertigung der TABSOLAR®-Elemente direkt in den frischen Beton einlegen zu können, müssen die bei der Erhärtung des Betons auftretenden Schwindspannungen kompensiert werden, welche möglicherweise zu Undichtigkeiten oder zum Versagen des Bauteils führen können.

Um diese auftretenden Schwindspannungen zu reduzieren, muss für den Beton Raum zum Schwinden geschaffen werden. Dazu sollten die gefertigten Anschlussstücke an den entsprechenden Stellen mit einem deformierbaren Material, z. B. Silikon- oder Polyurethankautschuk, überzogen werden. Infolge des Schwindens des Betons wird ein Pressdruck auf den Silikon- oder Polyurethanmantel erzeugt, welcher zu einer weiteren Abdichtung der Anschlussstelle beitragen kann.

Als Alternative könnten Anschlusssteile in den bereits erhärteten Beton eingeklebt und somit verbunden und abgedichtet werden. Bei diesem Verfahren ist jedoch die Temperaturbeständigkeit des verwendeten Klebstoffs zu berücksichtigen. Bei Überschreiten der kritischen Erweichungstemperatur des jeweiligen Klebstoffs kann es zum Versagen der Klebefuge und somit des TABSOLAR®-Elements kommen. Hierbei sind die jeweiligen Klebstoffe im Hinblick auf die Temperaturbeständigkeit zu untersuchen.

Von G.tecz und Fraunhofer ISE wurden verschiedene Konzepte für Hydraulikanschlüsse und geeignete Versuchskörper für Drucktests erarbeitet (Abbildung 47 und Abbildung 48).

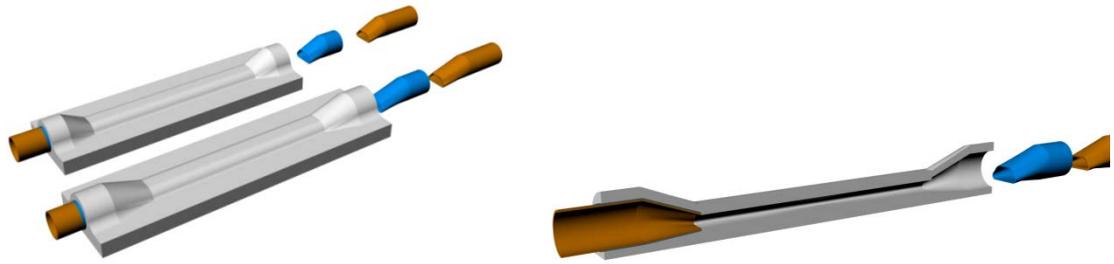


Abbildung 47: Versuchskörper mit beispielhaften Hydraulikanschlüssen; links: Gesamtansicht, rechts: Schnitt

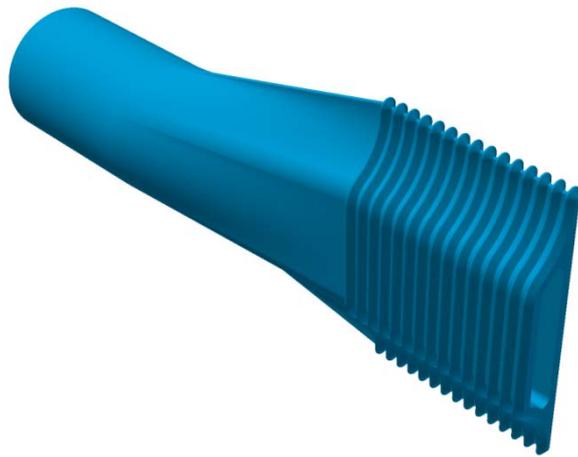


Abbildung 48: Hydraulikanschluss mit Rippenstruktur

Bedingt durch die Bauteilgeometrie der Anschlüsse und deren abweichenden Größenverhältnisse zur Dicke des TABSOLAR®-Elements können diese nicht mittig zu Achse der TABSOLAR®-Elemente angeordnet werden. Hierbei muss eine außermittige Lösung der Anschlusssituation konzipiert und entwickelt werden. Die außermittige Anordnung von Anschlüssen hat eine exponierte Lage zur Folge, was bei der Lagerung der TABSOLAR®-Elemente während des Transports vom Werk zur Baustelle berücksichtigt werden muss. Hierbei steigt der Platzbedarf der Betonelemente zum sicheren Transport.

Während das Konzept in Abbildung 47 von einer Manteldichtung ausgeht, besteht die Idee des Konzepts in Abbildung 48 darin, die Hydraulikanschlüsse mit einer Rippenstruktur zu versehen, um eine möglichst große Oberfläche mit mehreren Dichtflächen (durch die oben erwähnte Beschichtung, z. B. mittels Silikonkautschuk) zu erreichen. Um die einzelnen Anschlüsse im Hinblick auf Dichtigkeit, aber auch die Kanäle auf Innendruckbeständigkeit testen zu können, wurde eine Formplatte entworfen, die Kanäle mit verschiedenen Breiten aufweist. Die Kanalbreiten wurden variiert, um zu prüfen, ob auch Sammelkanäle, die mehrere TABSOLAR®-Elemente durch eine Parallelschaltung miteinander verbinden, direkt im TABSOLAR®-Element aus UHPC realisiert werden können. Der Druckverlust der

Sammelkanäle sollte deutlich geringer als jener in den einzelnen TABSOLAR®-Elementen sein, um eine gleichmäßige Durchströmung in den Kollektorfeldern sicherzustellen, daher muss der Querschnitt deutlich größer sein als innerhalb der FracTherm®-Struktur. Ausgehend vom Eintrittskanal der FracTherm®-Struktur wurden die Breiten daher variiert; die Kanalhöhe wurde zunächst beibehalten. Abbildung 49 zeigt einen Querschnitt eines Versuchselements auf der Formplatte, Abbildung 50 das Einlegen der Hydraulikanschlüsse in den UHPC.

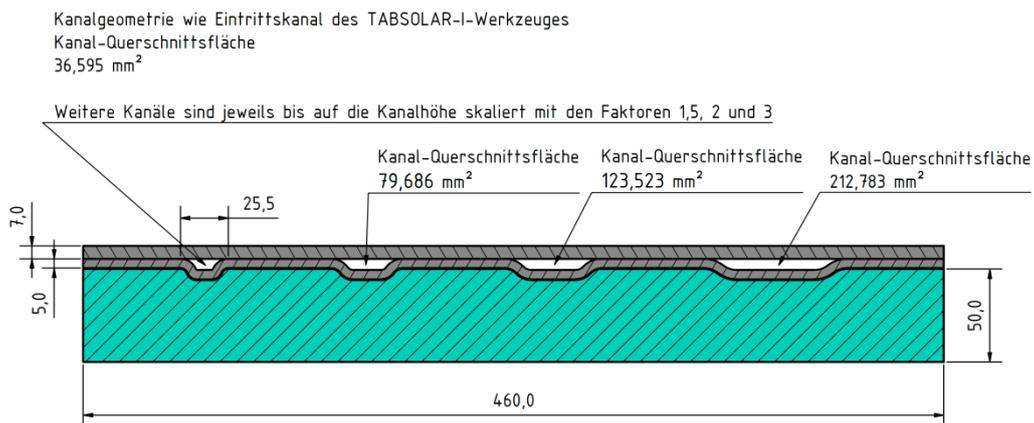


Abbildung 49: Querschnitt eines Versuchselements auf Formplatte

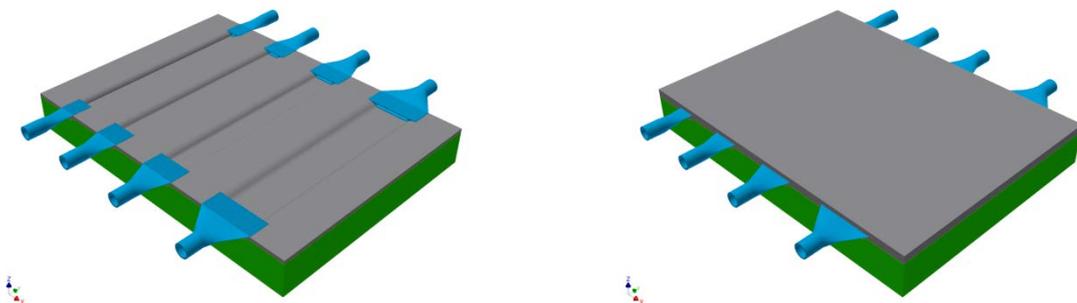


Abbildung 50: Hydraulikanschlüsse eingelegt in frischen, tiefgezogenen UHPC (links) und fertiges Bauteil nach vollständigem Membran-Vakuumtiefziehprozess (rechts) auf Formplatte

Die Beibehaltung der Kanalhöhe hätte im Hinblick auf die Stapelbarkeit der Elemente Vorteile, allerdings sind sehr breite Kanäle notwendig, um große Querschnittsflächen zu erreichen. Daher wurde vorgeschlagen, die Sammelkanäle halbrund zu gestalten, so dass sich mit zunehmender Breite auch die Höhe ändert. Vom Fraunhofer ISE wurden entsprechende Entwürfe angefertigt, die durch das KIT hinsichtlich ihrer zu erwartenden Innendruckbeständigkeit mittels FEM-Simulationen untersucht wurden (siehe 2.3.4).

Die Hydraulikanschlüsse für die Drucktests in der Formplatte wurden 3D-gedruckt. Für diese Versuche wurde das kleine, ursprüngliche Tiefziehwerkzeug aus TABSOLAR I wiederverwendet und entsprechend für die Anwendung modifiziert und umgerüstet. Für die ersten Bauteiltests wurden Anschlüsse aus 3D-gedrucktem Kunststoff verwendet. Später können diese Elemente als Serienprodukt gegebenenfalls in Metall ausgeführt werden. Für den ersten Versuchsschritt war es wichtig, die Form der Hydraulikanschlüsse kostengünstig und schnell adaptieren zu können.

Die Entwicklung der ersten Geometrien der Hydraulikanschlüsse entstand in enger Zusammenarbeit und im Austausch zwischen dem Fraunhofer ISE und G.tecz.

Das Konzept der Hydraulikanschlüsse mit Rippenstruktur wurde weiter ausgearbeitet (Abbildung 51).

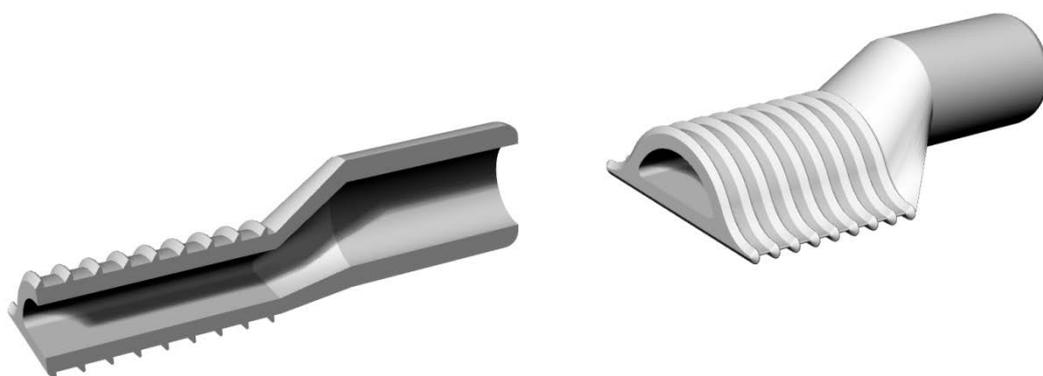


Abbildung 51: Ansicht eines beispielhaften Hydraulikanschlusses (links: geschnitten, rechts: Komplettansicht)

Die Hydraulikanschlüsse werden in den tiefgezogenen Frischbeton eingedrückt. Dabei werden die Rippen des Hydraulikanschlusses von Frischbeton umschlossen, wodurch sich diese im ausgehärteten Beton verankern können und ein Austreiben der Hydraulikanschlüsse im Betrieb verhindert werden soll.

Die ersten Hydraulikanschlüsse wurden bei G.tecz mit Hilfe eines Filamentdruckers aus PLA-Kunststoff hergestellt. Für umfangreichere Versuchsreihen wurden weitere Muster bei Spürgin gedruckt.

Zu Versuchszwecken wurden Bereiche der gedruckten Hydraulikanschlüsse mit unterschiedlichen Kunststoffen beschichtet und ausgewertet. In Abbildung 52 sind die verschiedenen beschichteten Versuchskörper zu sehen. Neben der Deformierbarkeit der Beschichtung ist ein ausreichender Haftverbund zum Kunststoff ein wichtiges Kriterium.



Abbildung 52: Hydraulikanschlüsse mit unterschiedlichen Beschichtungen der Firma SmoothOn: Silikon (Smooth Sil 950, links), Polyurethan (PMC770, Mitte), Epoxidharz (Plasti Paste II, rechts)

Bei der Untersuchung der Beschichtungen konnte eine ausreichende Deformierbarkeit der Silikon- und PU-Beschichtung dokumentiert werden. Die Epoxidharz-Beschichtung hingegen weist keine ausreichenden Deformationseigenschaften auf und wurde nicht weiterführend untersucht.

Zur Überprüfung der applizierten Beschichtungsstärke wurden die gedruckten Hydraulikanschlüsse entlang der Mittenlängsachse aufgeschnitten und die Schnittfläche begutachtet. Infolge der Bearbeitung konnte bereits eine Ablösung der Silikonschicht vom Druckmaterial beobachtet werden.

Obwohl davon auszugehen ist, dass durch den Schwindprozess des Betons die Beschichtung an den Hydraulikanschluss angedrückt wird und sich ein abdichtender Effekt einstellt, ist das Risiko einer Leckage gegeben. Daher wurde Silikon als Beschichtungsmaterial ebenfalls ausgeschlossen.

Das als Beschichtungsmaterial verwendete Polyurethan PMC770 der Firma SmoothOn ist zunächst als geeignet anzusehen. Die Eigenschaften sind an entsprechenden Bauteilen und Funktionsteilen zu überprüfen. Abbildung 53 zeigt Querschnitte von Hydraulikanschlüssen mit Silikon- bzw. Polyurethanbeschichtung. Im oberen Bereich der Abbildung 53 links sind bereits Ablösungen des Silikons vom Hydraulikanschluss zu erkennen.

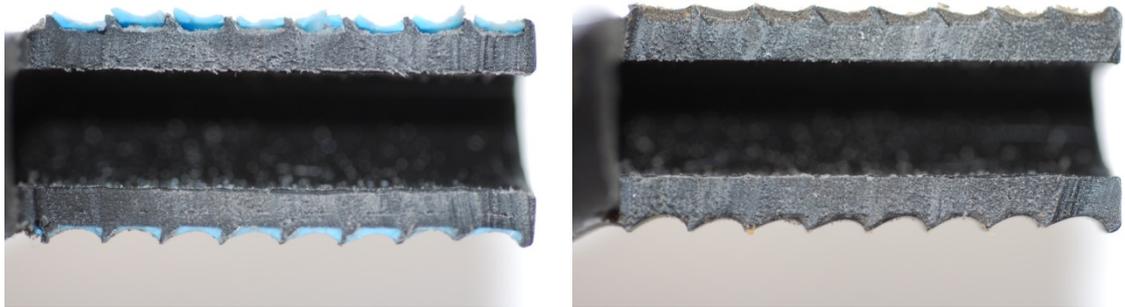


Abbildung 53: Schnittkanten von mit Silikon (links) bzw. Polyurethan (rechts) beschichteten Hydraulikanschlüssen

Üblicherweise werden Polyurethane auch als Schalungsmaterial im Baubereich verwendet. Durch den Verzicht auf ein Trennmittel konnte bei G.tecz bereits in vergangenen Projekten ein gutes Verbundverhalten zwischen Polyurethan und Beton festgestellt werden. Dieses Verbundverhalten kann zur Verbesserung der Abdichtung genutzt werden.

Der Umbau des Tiefziehwerkzeugs sowie die Frischbetonversuche wurden gemeinsam vom Fraunhofer ISE, Spürgin und G.tecz am Standort von Spürgin in Teningen durchgeführt. Hierzu wurden vor Ort Mischversuche durch G.tecz durchgeführt und die Mischungsrezeptur erfolgreich auf den vorhandenen Mischer adaptiert.

Zur Versuchsdurchführung wurden Frischbetone entsprechend der Mischungsrezeptur hergestellt und in die Schalung eingebaut. Abbildung 54 stellt die aus Frischbeton tiefgezogenen Kanalstrukturen der adaptierten Mischung dar.



Abbildung 54: Tiefgezogene Kanalstrukturen unter Verwendung der Spürgin adaptierten Mischungsrezeptur

Abbildung 55 zeigt die Formplatte mit tiefgezogener Membran und beispielhaft eingelegtem Hydraulikanschluss.

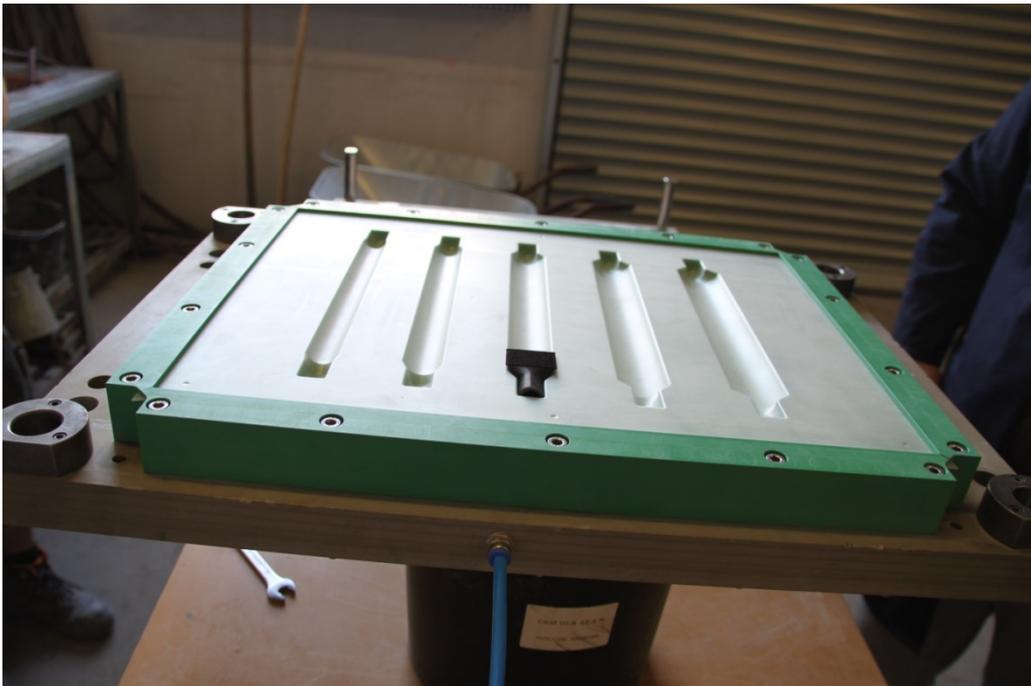


Abbildung 55: Tiefgezogene Membran mit einem eingelegten Hydraulikanschluss

Beim Membran-Vakuumtiefziehprozess (Abbildung 56) wurde bereits deutlich, dass das seitliche Wegfließen des UHPC vor dem Einlegen der Hydraulikanschlüsse problematisch ist. An dem hergestellten Bauteil sollten Dichtheits- und Innendrucktests durchgeführt werden. Es zeigte sich jedoch, dass alle Kanäle entweder verschlossen oder die Anschlüsse undicht waren (Abbildung 57).

Nach den erfolglosen Drucktests wurde ein Hydraulikanschluss demontiert und das Bauteil aufgesägt, um die Gestalt der Kanäle analysieren zu können. Es bestätigte sich, dass das seitliche Wegfließen des Betons zu Problemen geführt hatte; einige Kanäle waren durch UHPC verschlossen bzw. wiesen durch das Verdrängen des UHPC beim Einlegen der Hydraulikanschlüsse Aufwulstungen auf. Zwischen den Kanälen wurde zudem auch eine Undichtigkeit festgestellt.

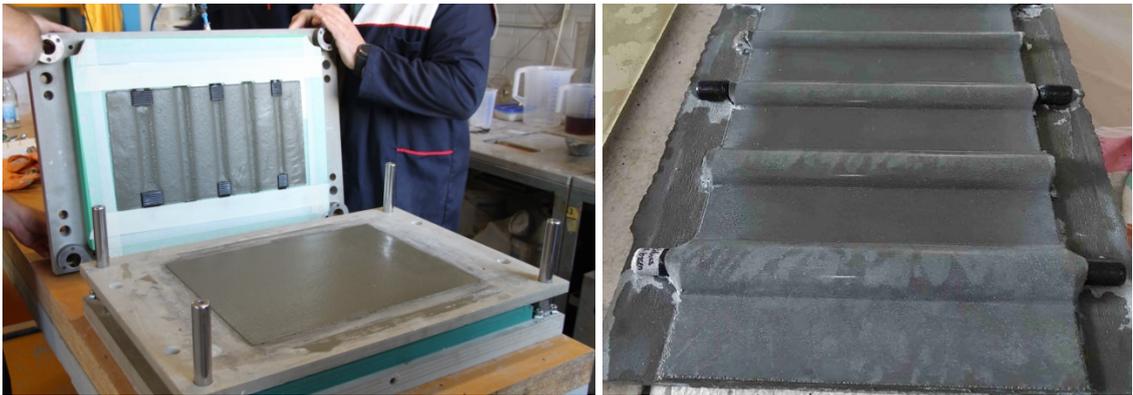


Abbildung 56: Wenden der tiefgezogenen UHPC-Hälfte mit eingelegten Hydraulikanschlüssen (links), ausgeschaltete Sammelkanäle aus UHPC mit eingebetteten Hydraulikanschlüssen (rechts)

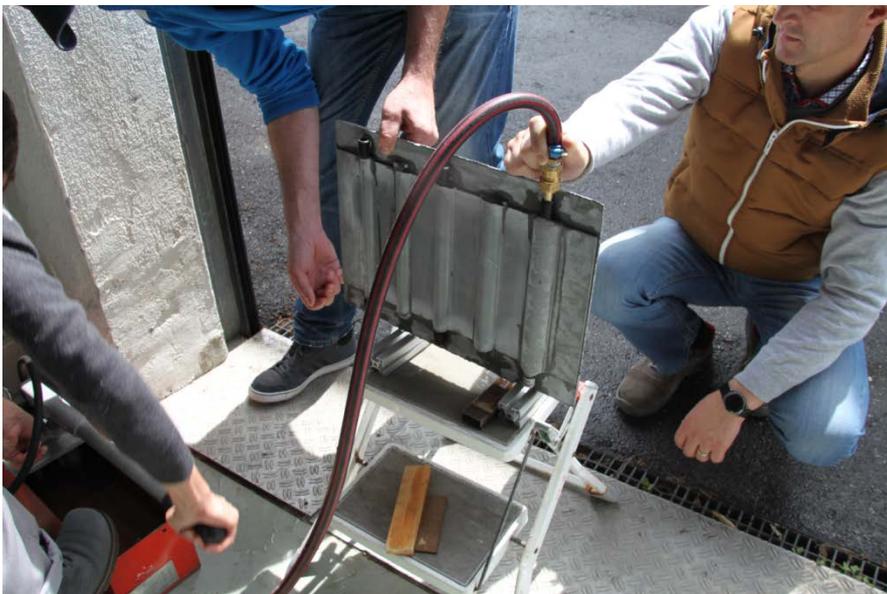


Abbildung 57: Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfungen an Sammelkanälen aus UHPC mit eingebetteten Hydraulikanschlüssen

Um sicherzustellen, dass die 3D-gedruckten Hydraulikanschlüsse selbst dicht sind, wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Materialien und Parametern für den 3D-Druck durchgeführt (Abbildung 58 links). Bei den Drucktests zeigten sich häufig Undichtigkeiten oder Verformungen, jedoch auch sehr gut geeignete Varianten. So war eine Variante bei 5 bar dicht, lediglich ab 7,5 bar war eine leichte Verformung sichtbar. Der Berstdruck lag bei 11 bar (Abbildung 58 rechts).



Abbildung 58: Hydraulikanschlüsse aus vier unterschiedlichen 3D-Druck-Materialien für Druckbeständigkeitsprüfungen (links), erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfung (11 bar Berstdruck) an einem von vier Hydraulikanschlüssen (rechts)

Darüber hinaus wurde der Fertigungsprozess mit Einlegen der Hydraulikanschlüsse überdacht. Um ein seitliches Wegfließen des UHPC zu verhindern, sollten die bislang für den Hydraulikanschluss vorhandenen Aussparungen in der Formplatte beim Tiefziehen noch nicht vorhanden sein, sondern erst mit Einlegen der Hydraulikanschlüsse freigegeben werden. Dies wurde durch eine tastenähnliche Konstruktion mit Federn und einem Arretiermechanismus erreicht. Zunächst konnte also UHPC tiefgezogen, anschließend die Tasten gedrückt und arretiert und schließlich die Hydraulikanschlüsse eingelegt werden (Abbildung 59).

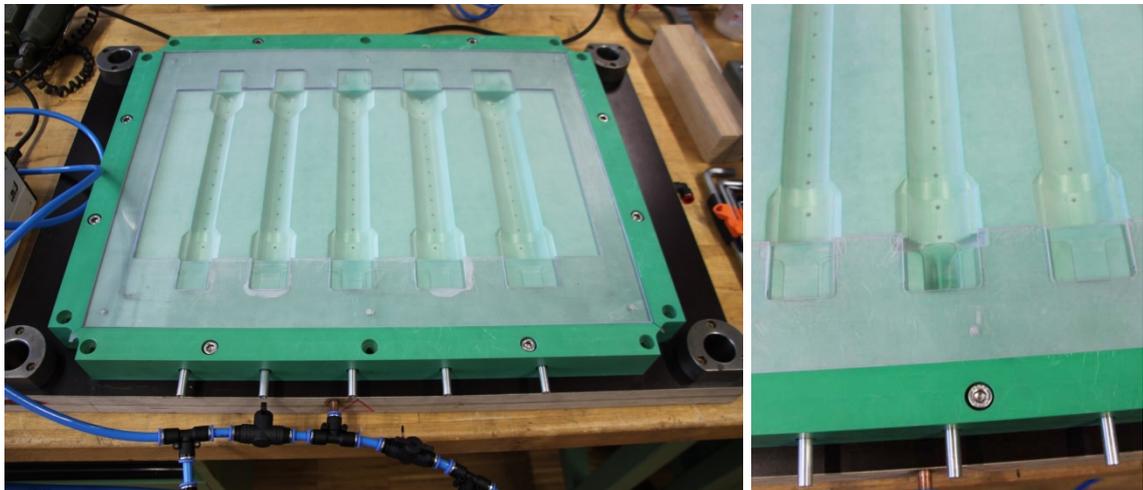


Abbildung 59: Angepasste Formplatte für verbesserte Herstellung der UHPC-Sammelkanäle mit Hydraulikanschlüssen (links); betätigte und arretierte, federnde Taste, die während des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens als bewegliche Schalung dient, um ein Wegfließen des UHPC an den Sammelkanalenden zu unterbinden (rechts)

Um darüber hinaus einen möglichst kontinuierlichen Übergang ohne Querschnittsänderungen von den Hydraulikanschlüssen in den UHPC-Kanal beim späteren Bauteil zu erreichen, wurde die Formplatte im Bereich der Hydraulikanschlüsse muffenartig erweitert

(Abbildung 60 links). Abbildung 60 rechts zeigt ein CAD-Modell der Sammelkanäle mit den integrierten Hydraulikanschlüssen.

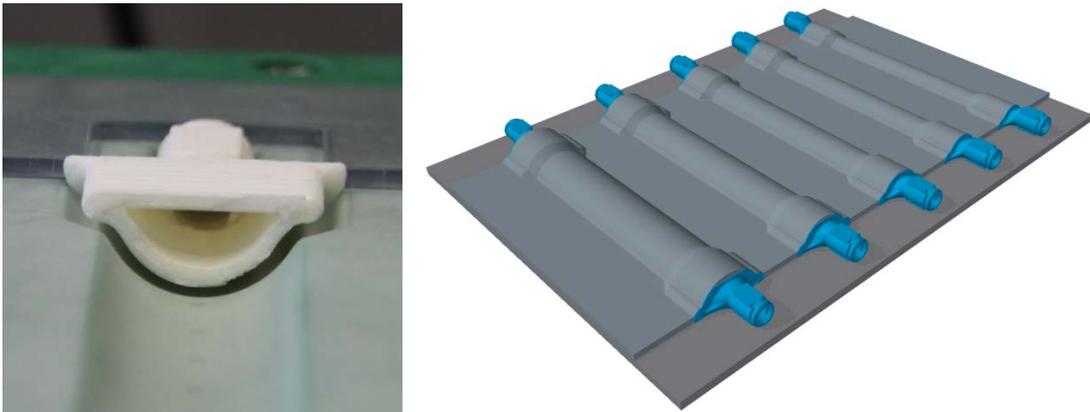


Abbildung 60: Eingelegter Hydraulikanschluss mit Kragen, der ein Wegfließen des UHPC verhindern soll (links); CAD-Modell der Sammelkanäle aus UHPC mit eingebetteten, angepassten Hydraulikanschlüssen (rechts)

Versuche, Anschlusssteile in den erhärteten Beton einzukleben, wurden nicht untersucht, weil die verfügbaren Klebstoffe nicht oder nur bedingt dauerhaft temperaturstabil sind.

Beim ersten entwickelten Hydraulikanschluss wurde versucht, durch direktes Einlegen in den noch nicht ausgehärteten UHPC zwei mechanische Funktionen in einem Schritt umzusetzen:

1. Mechanische Befestigung gegen Innendruck durch Rippen an der Mantelfläche des Hydraulik-Einlegeteils
2. Komprimierung der Abdichtmasse an der Mantelfläche des Hydraulik-Einlegeteils durch Schrumpfung des UHPC

Aufgrund der Misserfolge bei der direkten Einbettung von Hydraulikanschlüssen in die Sammelkanäle wurde von Fraunhofer ISE ein anderes Vorgehen entwickelt (vgl. von G.tecz vorgeschlagenes Konzept in Abbildung 47):

1. Einlegeteil aus PTFE, welches im UHPC lediglich die Form abbildet (Abbildung 61)
2. Einbringen des Hydraulikanschlusses mit Silikonummantelung oder mit O-Ringen (Abbildung 62)
3. Komprimierung der Dichtung und mechanische Befestigung mit Schrauben bzw. anderer Verbindungstechnik (Abbildung 63)

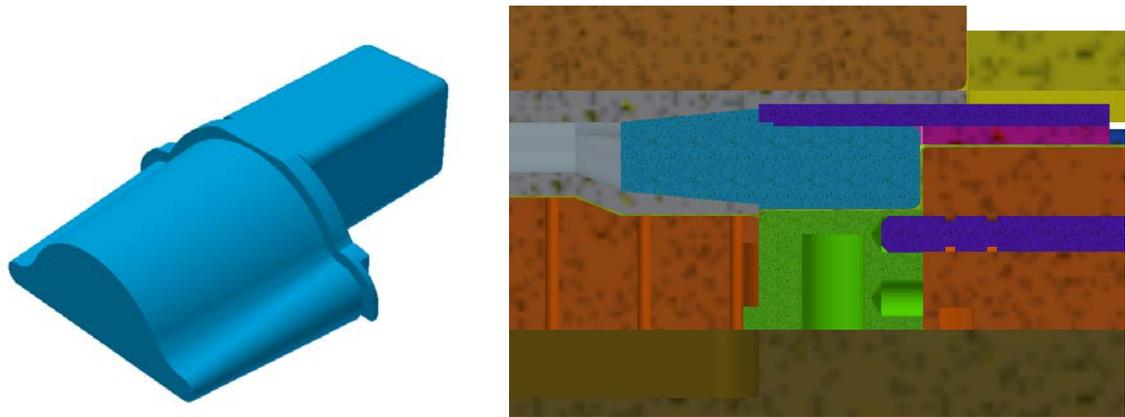


Abbildung 61: Einlegeteil mit Entformschräge aus PTFE (links), Schnittdarstellung im kleinen Werkzeug (rechts)

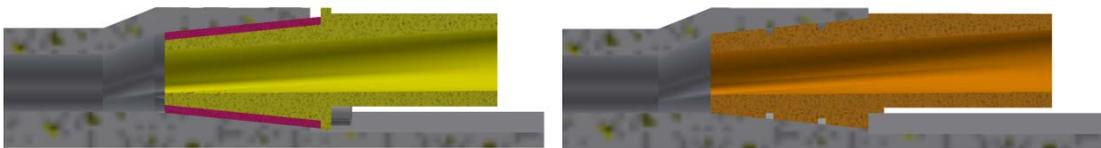


Abbildung 62: Schnittdarstellung des Hydraulikanschlusses mit Silikonummantelung (links) bzw. mit zwei O-Ring-Nuten (rechts) im UHPC-Sammelkanal

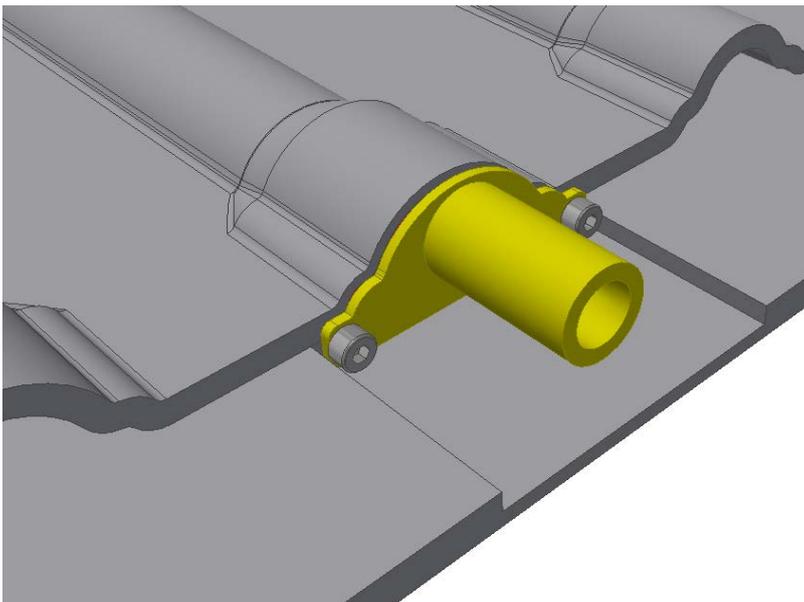


Abbildung 63: UHPC-Sammelkanal, Hydraulikanschluss mit Silikonummantelung und Befestigung gegen Innendruck

Um die Druckbeständigkeit der Hydraulikanschlüsse selbst zu testen, wurden von Spürgin UHPC-Würfel mit abgeformten Hydraulikanschlussformen gefertigt (Abbildung 64), in die die Hydraulikanschlüsse mittels eines flexiblen Klebstoffs (Abbildung 65 links) eingeklebt wurden. Später soll allerdings kein Klebstoff, sondern eine Silikonummantelung verwendet werden. Die Dichtung soll dann lediglich über eine Anpressung erfolgen.

Die Druckfestigkeit eines Hydraulikanschlusses in Verbindung mit dem flexiblen Klebstoff wurde am Fraunhofer ISE erfolgreich bis zu einem Druck von 15 bar geprüft (Abbildung 65 rechts), welcher weit über dem errechneten Berstdruck des Sammelkanals von 5 bar liegt.



Abbildung 64: Zwei UHPC-Würfel mit je zwei abgeformten Hydraulikanschlussformen (links), UHPC-Würfel mit eingeklebtem Hydraulikanschluss (rechts)



Abbildung 65: Flexibler Hochtemperaturklebstoff Duralco 4538 (links), Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfung des 3D-gedruckten Hydraulikanschlusses (rechts)

Mit Hilfe des kleinen Werkzeugs wurden bei Firma Spürgin zwei Prüfmuster erstellt (Abbildung 66), um an den Sammelkanälen Druckbeständigkeitsprüfungen am Fraunhofer ISE durchzuführen. Diese konnten jedoch wegen Undichtigkeiten aufgrund von Lunkern nicht durchgeführt werden (Abbildung 67).

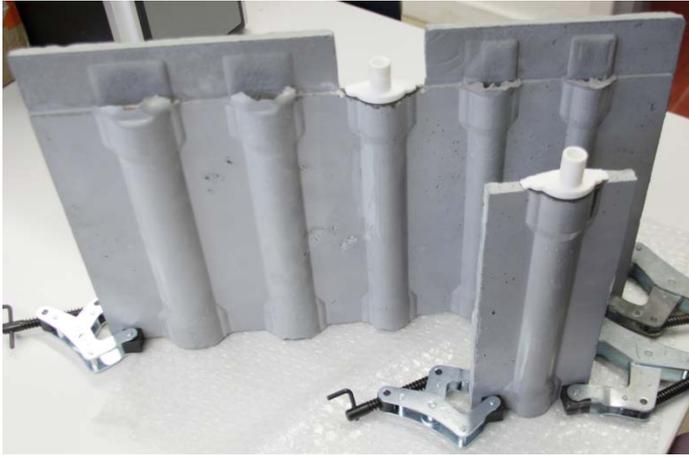


Abbildung 66: Mittlere UHPC-Sammelkanäle mit eingeklebten 3D-gedruckten Hydraulikanschlüssen



Abbildung 67: Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfungen am mittleren Sammelkanal aufgrund von Lunkern

Zur Befestigung der Hydraulikanschlüsse am UHPC-Modul sind Siebdübel mit Gewinde vorgesehen (Abbildung 68 bis Abbildung 71).

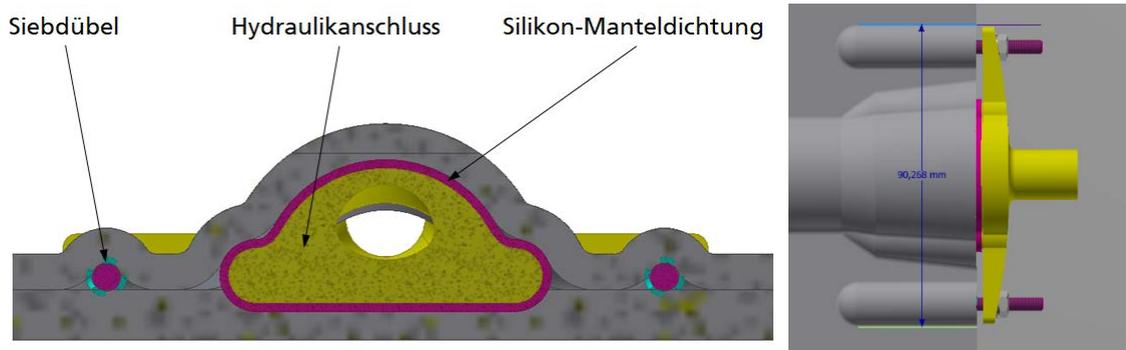


Abbildung 68: UHPC-Modul mit Hydraulikanschluss: Schnittdarstellung (links) und Draufsicht (rechts)

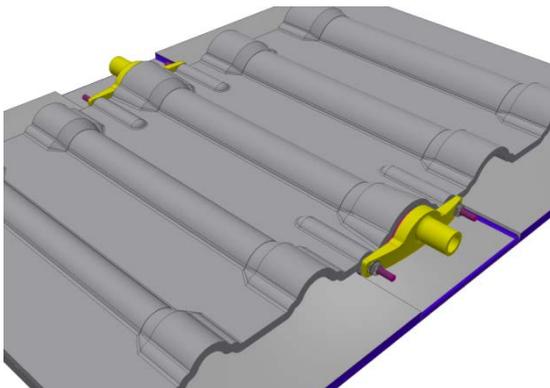


Abbildung 69: UHPC-Modul mit Hydraulikanschlüssen

Zur Umsetzung von Fertigungsversuchen wurde das kleine Werkzeug aus TABSOLAR I vom Fraunhofer ISE entsprechend umkonstruiert. Zur Abformung der Hydraulikanschlussgeometrie wird ein PTFE-Anschluss-Einlegeteil verwendet. Eine Positionierplatte gewährleistet die Position der Siebdübel zum Anschluss (Abbildung 70).

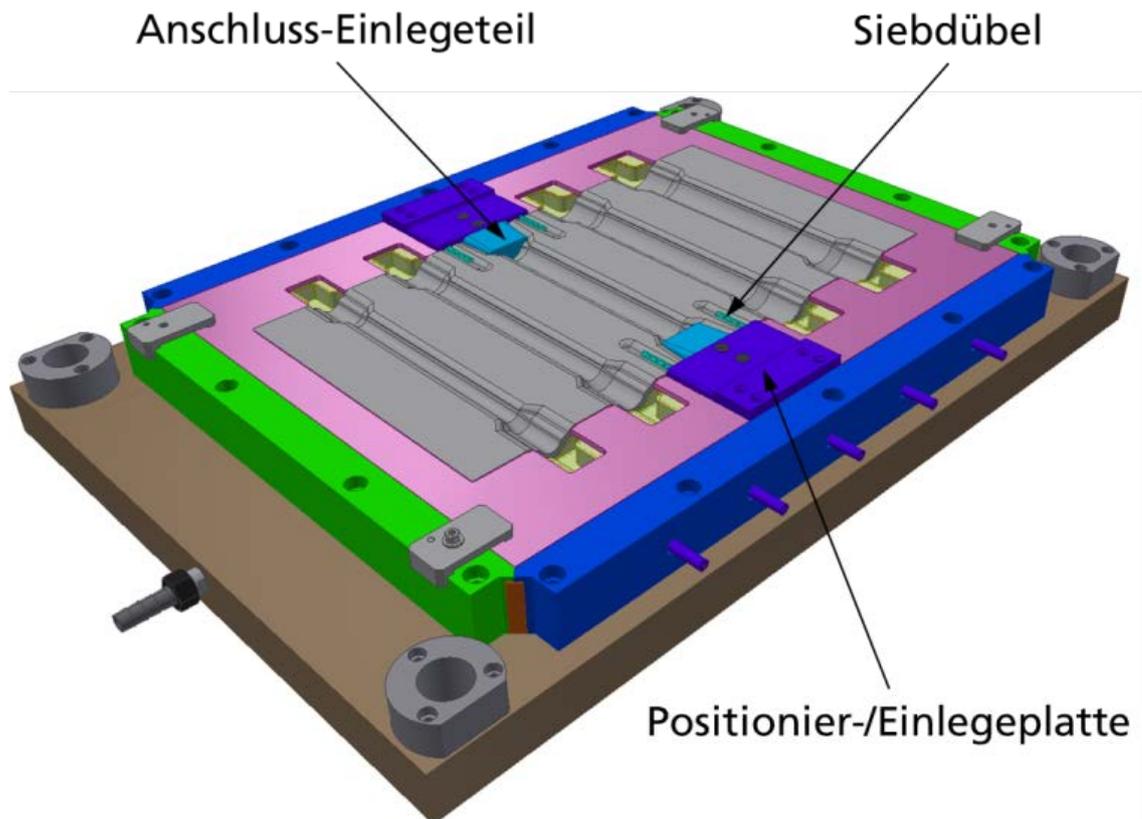


Abbildung 70: Kleines Werkzeug mit Hydraulikanschluss-Einlegeteil, Siebdübel und Positionierplatte

Für die ersten Fertigungsversuche wurden Siebdübel händisch hergestellt (Abbildung 71). Die Bohrungsgröße sowie der Bohrungsabstand sind frei veränderbar, so dass aus den Erkenntnissen der Fertigungsversuche geeignete Siebdübel hergestellt werden können. Das Ziel besteht darin, dass beim Zusammenbringen der beiden UHPC-Hälften der noch nicht erstarrte UHPC in die Bohrungsöffnungen eintaucht und somit den Siebdübel formschlüssig einbettet. Aufgrund der Schwindung bei der Erstarrung des UHPC kann kein Vollmaterial als Verbindungselement eingebettet werden, da ansonsten Spannungen im UHPC entstehen. Die Verbindung zwischen Siebdübel und Gewindestange ist mittels Punktschweißen angedacht.

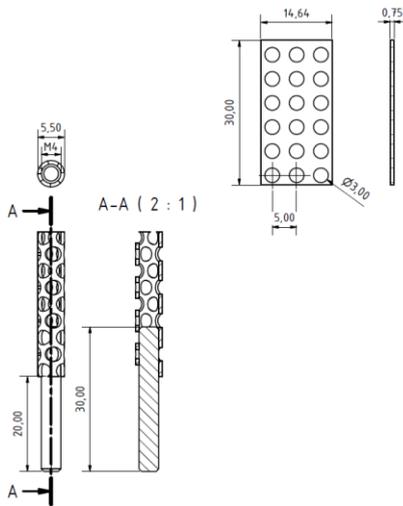


Abbildung 71: Siebdübel mit Gewindestange: Zeichnung (links), händisch hergestellte Exemplare (rechts)

Für die Hydraulikanschlüsse wurden Manteldichtungen aus 2K-Silikon hergestellt, siehe Abbildung 72 und Abbildung 73. Vier Hydraulikanschlüsse wurden von einer externen Firma aus Nylon 3D-gedruckt. Abbildung 74 zeigt einen Hydraulikanschluss mit Manteldichtung.



Abbildung 72: Herstellung Manteldichtung mit 2K-Silikon und Exsikkator



Abbildung 73: Aus einem wasserlöslichen Filament gedruckte Gießform (links), Gießform gefüllt mit 2K-Silikon (Mitte), hergestellte Manteldichtung nach Auflösung der Gießform im Wasserbad (rechts)



Abbildung 74: 3D-gedruckter Hydraulikanschluss aus Nylon mit Manteldichtung aus 2K-Silikon

2.3.4 Mechanische Untersuchungen

Biegezugfestigkeit der Verbindungsflächen des TABSOLAR®-Elements

Zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit quer zur Verbindungsfläche der Schichten des TABSOLAR®-Elements wurden von G.tecz UHPC-Platten (Schichtdicken ca. 7 mm) gesägt und nach Abbindezeiten t_A von 0, 15 und 30 Minuten zusammengefügt. Aus diesen Platten wurden am KIT Proben mit den Abmaßen: 20 mm x 20 mm x 14 mm gesägt und nach Anschleifen der Oberfläche mit 2K-Epoxyd-Kleber zwischen Halterklötze aus Aluminium geklebt (Abbildung 75). Bei Proben mit Abbindezeiten von 30 Minuten fielen die Proben an der Kontaktschicht bereits beim Sägen auseinander. Die restlichen Proben wurden im 3-Punkt-Biegeversuch mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/min bis zum Versagen belastet (Abbildung 76). Die ermittelten Probenabmaße, Bruchkräfte und daraus errechneten Bruchspannungen sind in Tabelle 7 gelistet.

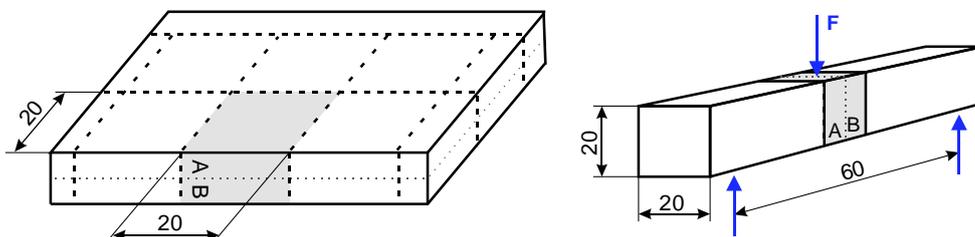


Abbildung 75: Skizzen der zweischichtigen Proben (Schicht A und B) und des 3-Punkt-Biegeversuchs

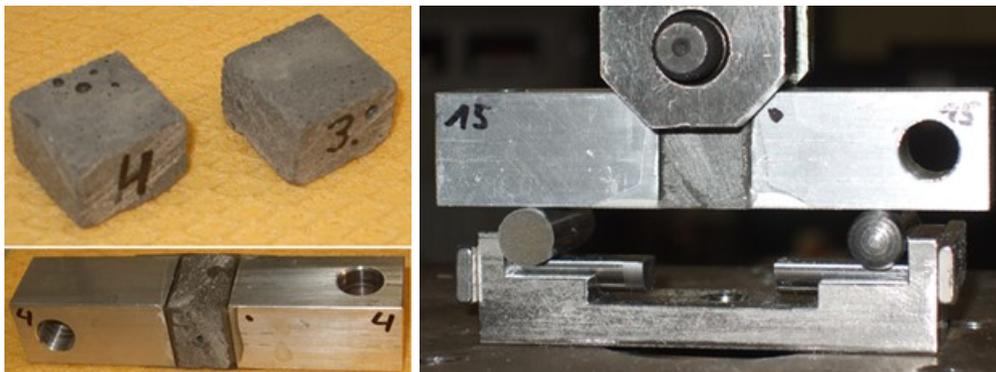


Abbildung 76: Proben und 3-Punkt-Biegeversuch

Tabelle 7: Probenmaße und Bruchspannungen σ . *Bruch entlang Kontaktfläche

Nr.	Abbindezeit t_A [min]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Dicke [mm]	F_{max} [N]	σ [MPa]
1	15	20,2	19,75	14	1643	18,8
2	15	20,15	20,75	14,15	1389	14,4*
3	15	20,75	21,15	14,45	1473	14,3*
4	15	20,85	20,4	14,55	1752	18,2
5	15	20,75	20,85	14,5	1563	15,6
11	0	19,9	20,75	14,8	1558	16,4
12	0	20	21,1	15,1	1701	17,2
13	0	20,1	20,7	13,8	1447	15,1
14	0	20,5	21,15	14,6	1752	17,2
15	0	20,55	21,25	15,2	1810	17,6

Die Brüche der Proben mit der Abbindezeit $t_A = 0$ min verlaufen alle im Beton, zum Teil auch mit geringen Anteilen an der Klebeschicht, und erreichen im Mittel eine Festigkeit von 16,7 MPa (Abbildung 78). Bei zwei der Proben mit der Abbindezeit $t_A = 15$ min erfolgten die Brüche bei etwas geringeren Bruchspannungen (14,3 bzw. 14,4 MPa) entlang der Kontaktfläche (siehe Abbildung 77 links). Auffällig an den Kontaktflächenbrüchen sind die Luftporenschlüsse.

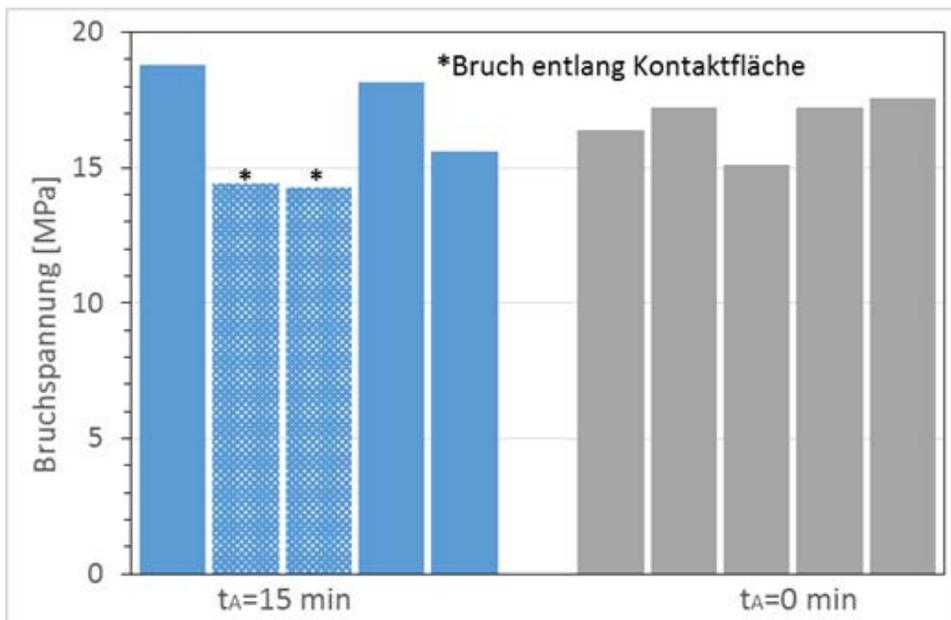


Abbildung 77: Bruchspannungen

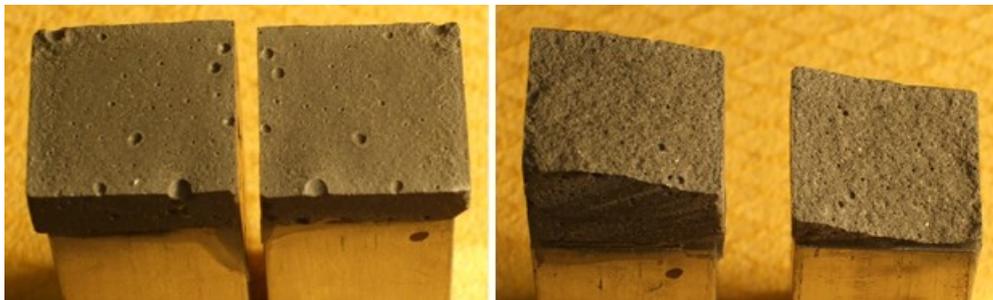


Abbildung 78: Bruchbilder der Proben. Der Bruch verläuft bei Probe 3 (links) entlang der Kontaktfläche, bei Probe 11 (rechts) im Beton

Fazit: Die Abbindezeit bei der Fertigung ist ein wichtiger Parameter. Längere Abbindezeiten reduzieren die Festigkeit der Kontaktflächen und machen diese zur Schwachstelle. Bei $t_A = 15$ min versagten 2 von 5 Proben an den Kontaktflächen bei etwas geringeren Bruchspannungen, $t_A = 30$ min führte bereits bei der Probenherstellung zum Versagen. Ansonsten weist der Beton im Versuch sehr gute Biegezugfestigkeiten (im Mittel über 16 MPa) auf. Berücksichtigt man, dass im 3-Punkt-Biegeversuch an kleinen Proben ermittelte Werte höher ausfallen, erscheint im TABSOLAR®-Element eine Mindestbiegezugfestigkeit von über 10 MPa noch realistisch.

FEM-Analysen zum Maximaldruck in Sammelkanälen

Auf Basis eines Entwurfs des Fraunhofer ISE wurden am KIT FE-Modelle für Sammelkanäle mit Breiten (KB) zwischen 15 und 35 mm (Abbildung 79) erstellt. Die Gesamtdicke wurde dabei entsprechend den Lagendicken (7 und 5 mm) von 11 auf 12 mm geändert. Das Fraunhofer ISE hatte zunächst eine Einpresstiefe von 1 mm angenommen; diese wurde je-

doch als zu hoch eingeschätzt und daher korrigiert. Es wurde eine Modellhälfte erzeugt und diese mit einem Innendruck von 1 bar beaufschlagt. Abbildung 80 zeigt die Ergebnisse der FEM-Simulationen.

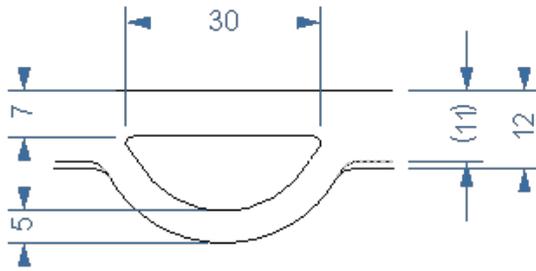


Abbildung 79: Sammelkanal 30 mm breit

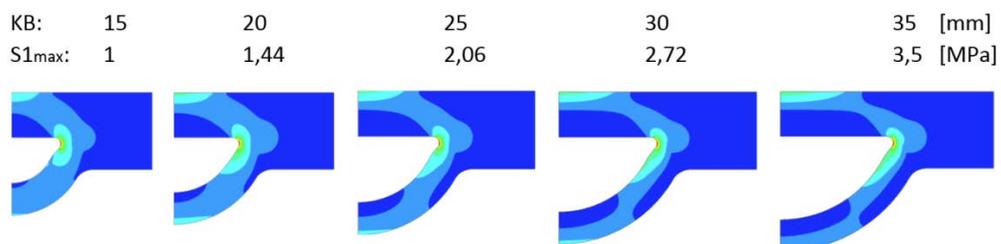


Abbildung 80: Zugspannungsverteilungen (S1) und Maximalwerte der (Halb-) Modelle bei 1 bar Innendruck

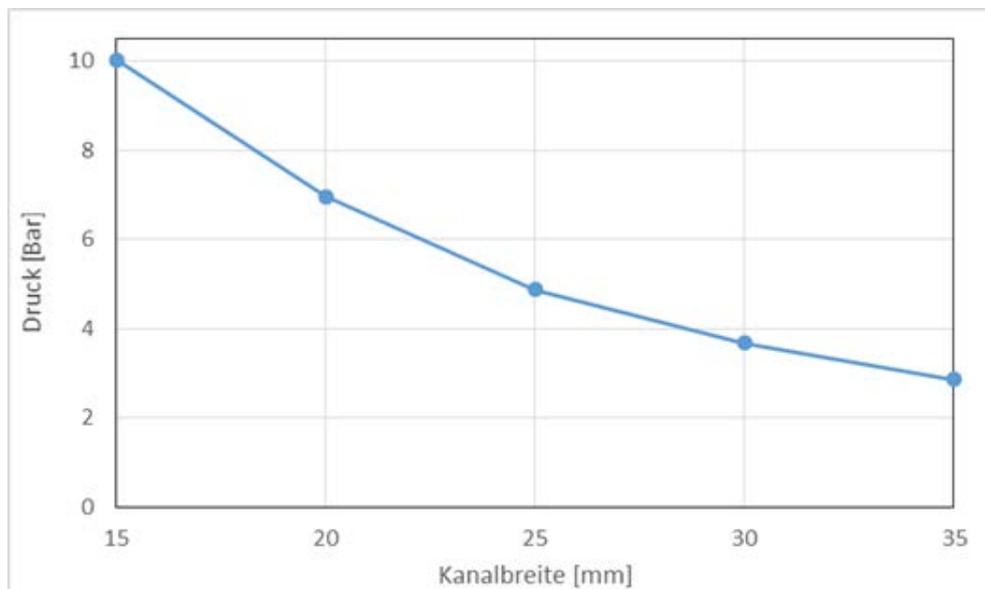


Abbildung 81: Errechneter Berstdruck (bei 10 MPa Zugfestigkeit des UHPC)

Den berechneten Berstdrücken (Abbildung 81) liegen die Geometrie aus Abbildung 79 und die Annahme zugrunde, dass die Zugfestigkeit des UHPC nicht weniger als 10 MPa beträgt. Da herstellungsbedingt signifikante Abweichungen der Geometrie insbesondere

im Bereich der kleinen Innenradien nicht ausgeschlossen werden können, können bei den realen TABSOLAR®-Elementen auch niedrigere Maximaldrücke zum Versagen führen.

Der nächste Schritt in Richtung realitätsnäherer Modellierung war die Herstellung von Proben mit verschiedenen Kanalformen und deren Vermessung. Eine von Spürgin gefertigte Kanalplatte mit Sammelkanalmustern unterschiedlichen Querschnitts wurde vom KIT quer zu den Kanälen in ca. 20 mm breite Streifen geschnitten (siehe Abbildung 82). Der Beton der ebenen Plattenschicht ist dunkel eingefärbt, um auch im Kontaktbereich das Material den Schichten zuordnen zu können.

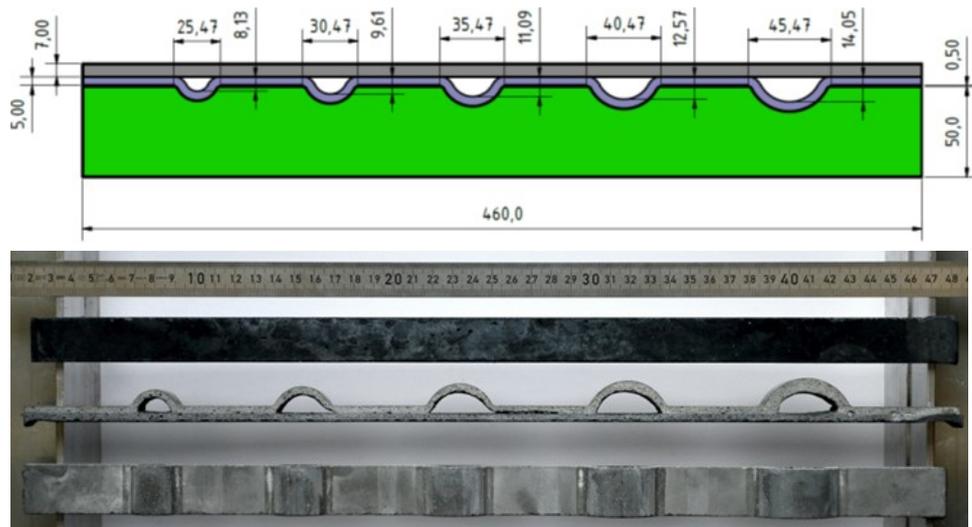


Abbildung 82: Zeichnung der Platte mit unterschiedlichen Kanalquerschnitten (oben) und in ca. 20 mm breite Streifen geschnittene Proben

Die Platten- und Schichtdicken wurden an verschiedenen Positionen (siehe Abbildung 83) mit einem Messschieber bestimmt. Die Gesamtdicke in den Bereichen zwischen den Kanälen beträgt relativ gleichmäßig 8 mm. Die dunklere, ebene Schicht ist im mittleren Bereich der Platte ca. 4,4 mm dick, steigt aber in den Kanälen näher an den Plattenrändern auf bis zu 5,7 mm an. Dort ist die Schicht infolge von Materialverdrängung auch etwas aufgewölbt.

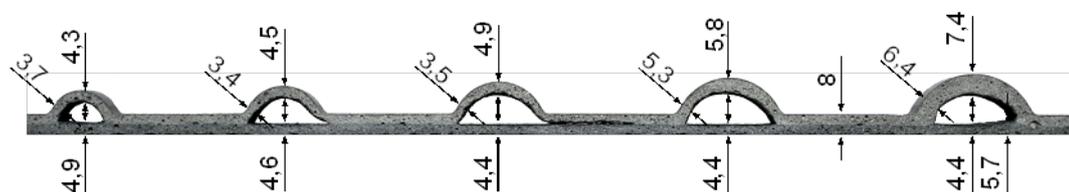


Abbildung 83: Lokale Schichtdicken

Die hellere, gewölbte Schicht weist in den Kanälen deutliche Dickenunterschiede, zwischen 3,4 mm und 7,4 mm, auf. Dabei ist die Wandstärke in der Kanalmitte in der Regel am höchsten und nimmt zu den Seiten hin ab. Mit zunehmender Kanalbreite nimmt die maximale Schichtdicke zu. Dies ist hauptsächlich durch die Nachgiebigkeit der Membran bedingt, die im Bereich der Kanäle nicht vom Grundkörper getragen wird und sich unter dem Eigen- und Betongewicht durchbiegt. Der Zusammenhang zwischen nominaler Kanalbreite und maximaler lokaler Wandstärke kann in guter Näherung mit einer quadratischen Funktion beschrieben werden (Abbildung 84).

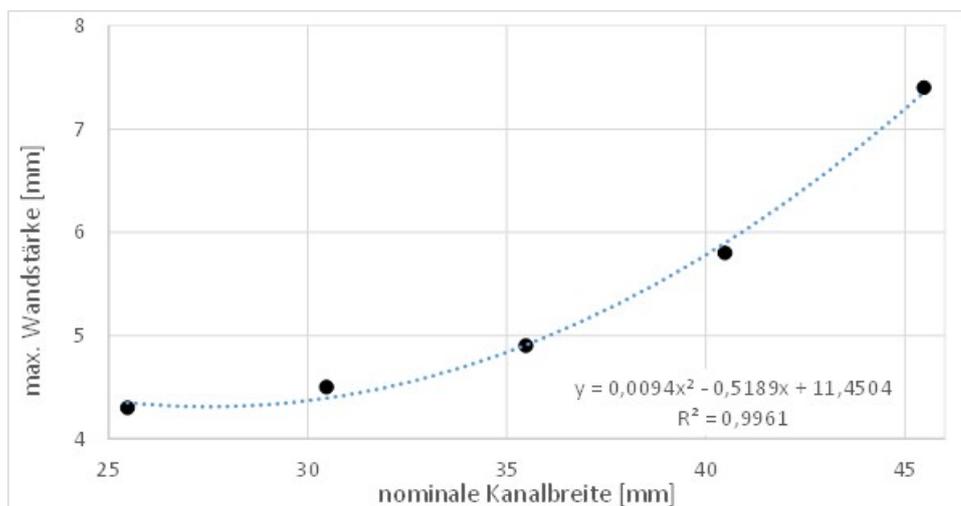


Abbildung 84: Zusammenhang zwischen maximaler Wandstärke und nominaler Kanalbreite

Die Verbindung der beiden Schichten ist überwiegend gut, lediglich im mittleren Bereich der Platte klappt ausgehend vom Kanal ein Spalt zwischen den Schichten (siehe Abbildung 85 links). Ebenfalls nahe der Plattenmitte befindet sich als Vorstufe zum Spalt eine längliche Zwickelform (siehe Abbildung 85 rechts). Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, ist, beim Zusammenfügen die obere Form zu beschweren.



Abbildung 85: Spalt zwischen den Schichten (links) und längliche Zwickelform (rechts)

Die Form der Zwickel hat Auswirkung auf die Druckfestigkeit und Haltbarkeit der TABSOLAR®-Elemente. Wie in Abbildung 86 links zu sehen ist, können sich Formen mit

ungünstig kleinen Kerbradien ausbilden. Durch verdrängtes Material kann die Ausformung günstiger gestaltet werden (siehe Abbildung 86 rechts).

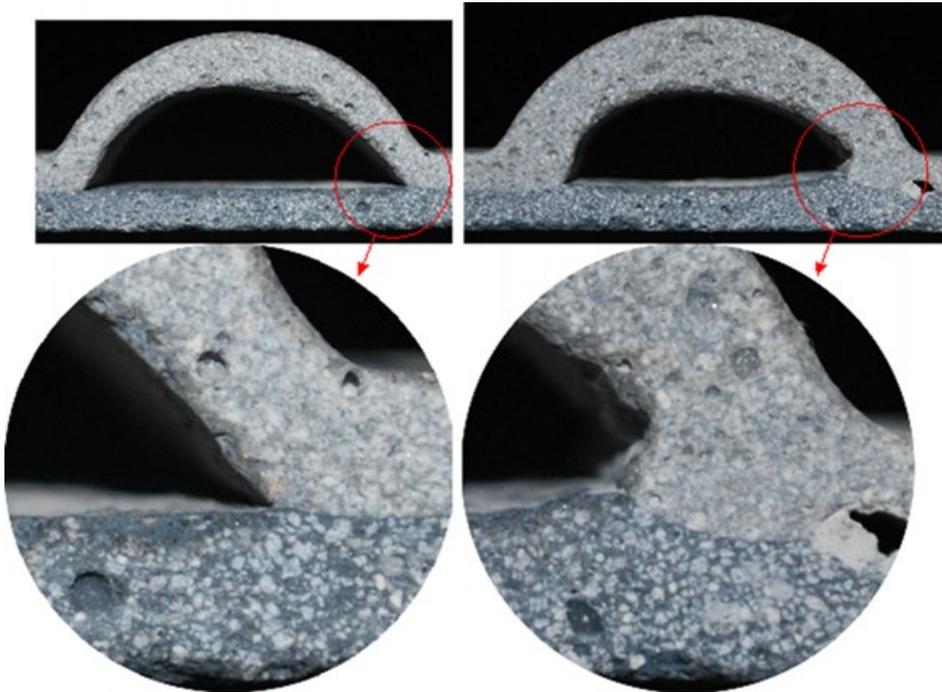


Abbildung 86: Zwickelformen

Zugversuche an Sammelkanälen

Die Sammelkanäle sind die gefährdetsten Strukturbereiche. Der Betriebsdruck verursacht, aufgrund großer Querschnitte, dort die höchsten Belastungen. Zur Ermittlung von Bruchlast und Versagensort wurden am KIT Zugversuche durchgeführt. Beim Zugversuch herrschen im kritischen Zwickelbereich ähnlichen Spannungszustände wie unter Innendruck, und bei gleichem Aufwand können sowohl mehr Versuche durchgeführt als auch die Orte der Rissentstehung besser lokalisiert werden. Die von Spürgin gefertigte Kanalplatte wurde quer zu den Kanälen in ca. 20 mm breite Streifen geschnitten. Aus diesen Streifen wurden die Kanäle in ihrer Mitte durchtrennt, die Hälften auf Probenhalter geklebt und in einer Prüfmaschine unter Zug bis zum Bruch belastet (Abbildung 87 links). Abbildung 87 rechts zeigt eine typische Kraft-Weg Kurve.

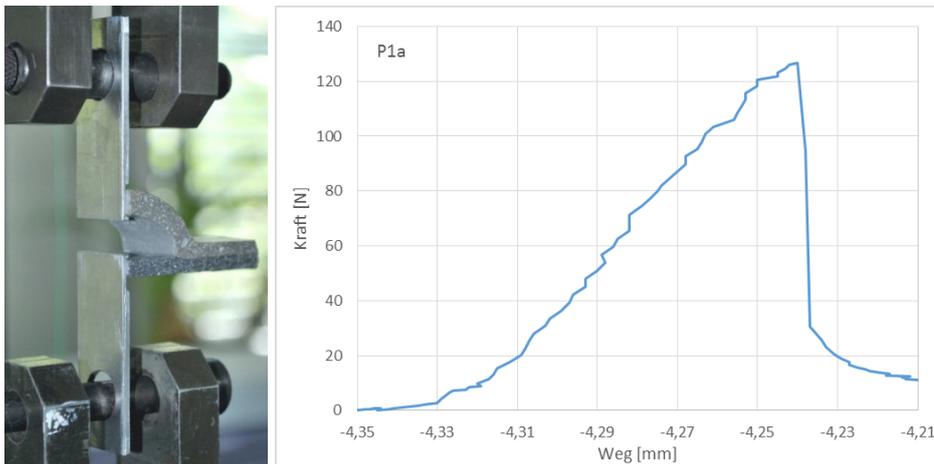


Abbildung 87: Halber Kanalquerschnitt (links) in der Zugprüfmaschine und Kraft-Weg-Diagramm (rechts)

In Abbildung 88 oben sind die Bruchkräfte und Versagensorte (roten Linien) der untersuchten Proben dargestellt. Darunter befinden sich die gemessenen Wandstärken. Unten im Bild sind zwei gebrochene Proben vergrößert abgebildet. Die Versagensorte waren nur zum Teil im Bereich der Zwickel, wo man sie aufgrund der Kerbspannungen erwarten würde. Insbesondere bei den kleineren Kanalquerschnitten erfolgte das Versagen in Bereichen mit dünner Wandung seitlich der Kerbe. Trotz der geometrischen Schwäche ist das ein Indiz dafür, dass der verwendete UHPC eine gewisse Plastizität aufweist und damit nicht hochgradig kerbempfindlich ist. Die Verbindung der beiden Hälften selbst hat sich bei allen Proben als sehr haltbar erwiesen.

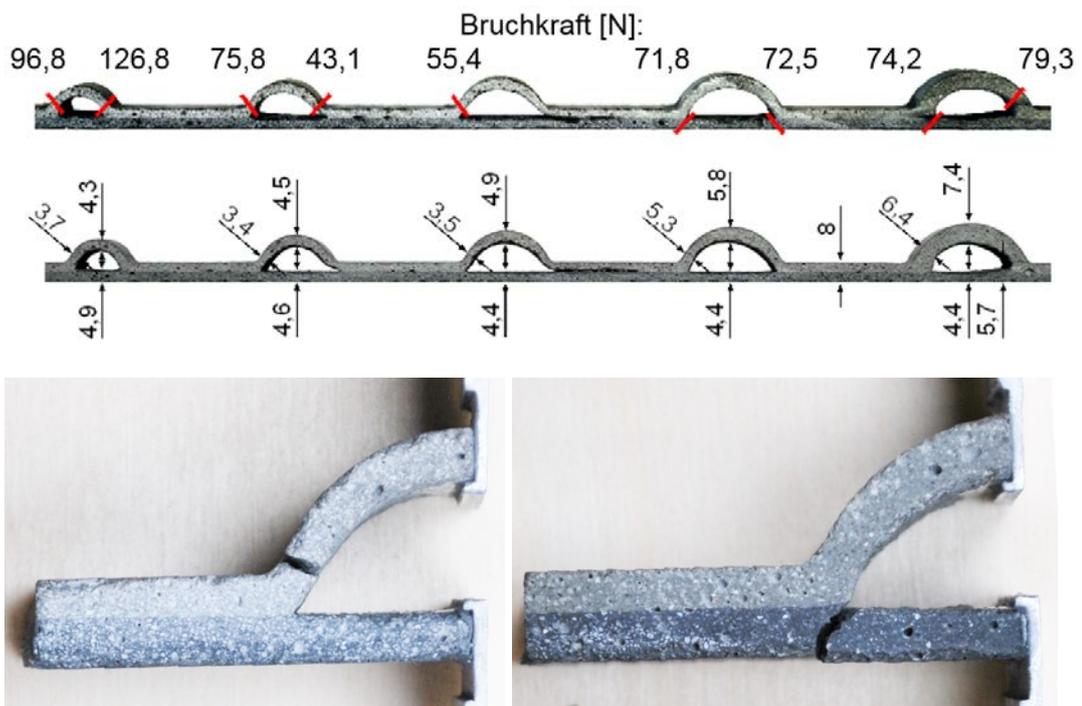


Abbildung 88: Oben: Bruchkräfte und Versagensorte (rote Linien), Mitte: gemessene Wandstärken, unten: gebrochene Proben

Die FEM-Analysen (Abbildung 89) unter Innendruckbelastung zeigen im Zwickelbereich ähnliche Spannungsverteilungen wie die Analysen des durchgeführten Zugversuchs und erlauben eine Abschätzung der entsprechenden kritischen Versagensdrücke (zwischen ca. 2,1 und 6,4 bar). Analysen mit symmetrischer Zugbelastung, also eines kompletten Sammelkanals, zeigen nochmals breitere Übereinstimmung mit dem Innendruck-Lastfall.

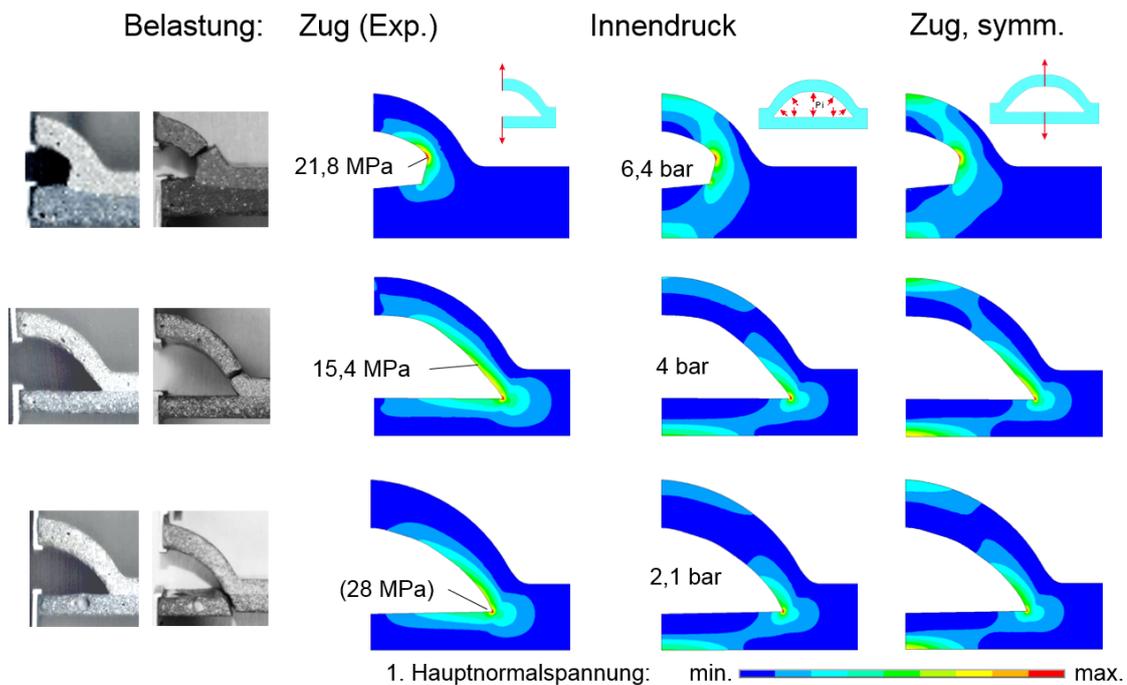


Abbildung 89: SpannungspLOTS der durchgeführten Zugversuche (links), unter Innendruck (mittig) und symmetrischer Halbmodelle (rechts) auf Basis der Probenfotos

Materialverdrängung

Ein gewisses Maß an Durchdringung, und damit auch Materialverdrängung über den einfachen Plattenkontakt hinaus, ist aufgrund unvermeidbarer lokaler Oberflächenunebenheiten, Betonfüllmengen-, Form- und Maßabweichungen für eine sichere Verbindung der beiden Platten erforderlich. Die Analyse der bisher gefertigten Strukturen zeigt, dass verdrängtes Material unter anderem Kanalquerschnitte verengt und lokal variierende Wandstärken bedingt. Das verdrängte Material läuft in die Kanäle und reduziert deren Querschnitte zum Teil nicht unerheblich. Ein einfaches, vom realen TABSOLAR®-Element abgeleitetes Modell (Abbildung 90) verdeutlicht die Problematik. Bei einer Elementbreite von 725 mm und 16 je 10 mm breiten Kanälen ($L_v:L_h = 3,5:1$) mit 45° schrägen Wänden führt bereits eine Durchdringung h_p von 0,1 mm zu einem Anstieg des Spiegels in den Kanälen um $h_k = 0,36$ mm. Der Anstieg ist nichtlinear, sodass eine Durchdringung von 0,3 mm zu einem überproportionalen Anstieg des Spiegels in den Kanälen um 1,2 mm führt. Da enge Toleranzen im Zehntel-Millimeter-Bereich im rauen Betriebsumfeld kaum realisierbar sind, sind weitere Ansätze erforderlich.

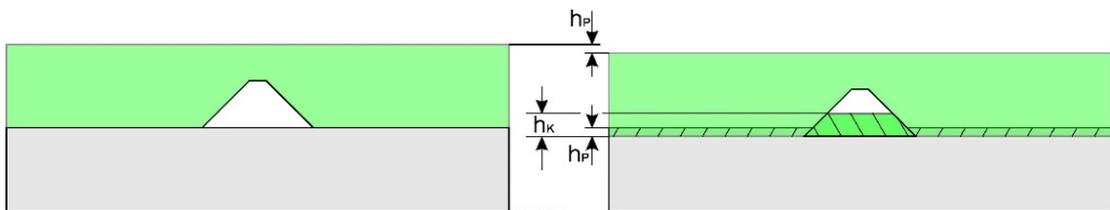


Abbildung 90: Modell zur Materialverdrängung aufgrund der erforderlichen Durchdringung und daraus resultierender Querschnittsminderung der Kanäle

Über das von Spürgin vorgeschlagene verbesserte Auftragsverfahren kann diese Problematik durch Bereitstellung von Reservoirs, die verdrängtes Material aufnehmen, weiter entschärft werden. Größere Bereiche, in denen obere und untere Platte flächig Kontakt haben, sollten vermieden werden, da dadurch besonders hohe Maßhaltigkeit erforderlich oder andernfalls viel Material verdrängt wird. Dies lässt sich leicht umgehen, indem das vorhandene Tiefziehwerkzeug in diesen Bereichen, wie in Abbildung 91 als Prinzipskizze gezeigt, modifiziert wird.

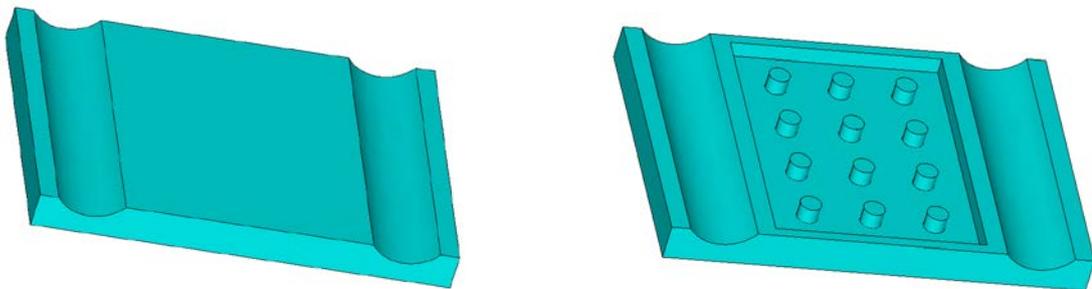


Abbildung 91: Modifikation des Tiefziehwerkzeuges in flächigen Bereichen zur Minimierung der Materialverdrängung

Weiterhin können mittels einer Vorrichtung (Abbildung 92 A) die Ebenheit der Formplatte bzw. Abweichungen der Ebenheit durch die Fertigung, Eigenspannungen etc. gezielt eingestellt bzw. korrigiert werden. Eine Vorverwölbung der Formplatte kann genutzt werden, um thermische Verformungen beim Aushärten des Betons teilweise zu kompensieren, um lokale Materialverdrängungen und damit auch Verstopfungen der Kanäle oder auch die lokalen Plattendicken zu beeinflussen. Zum Beispiel würde eine Vorverformung der ebenen Plattenhälfte gemäß Abbildung 92 B die Plattendicke im Vergleich zu Abbildung 88 homogenisieren. Die Vorrichtung basiert auf dem aktuellen Rahmenkonzept, mindestens eine Traverse mit einer Einstellmöglichkeit ist erforderlich, mehrere sind möglich. Die Vorrichtung kann sowohl an der unteren als auch an der oberen Platte angebracht werden. Möglich wäre auch ein Konzept ohne feste Direktverbindung von Formplatte und Rahmen, das über mehrere auf der Fläche verteilte Halte- und Einstellpunkte fixiert wird (Abbildung 92 C).

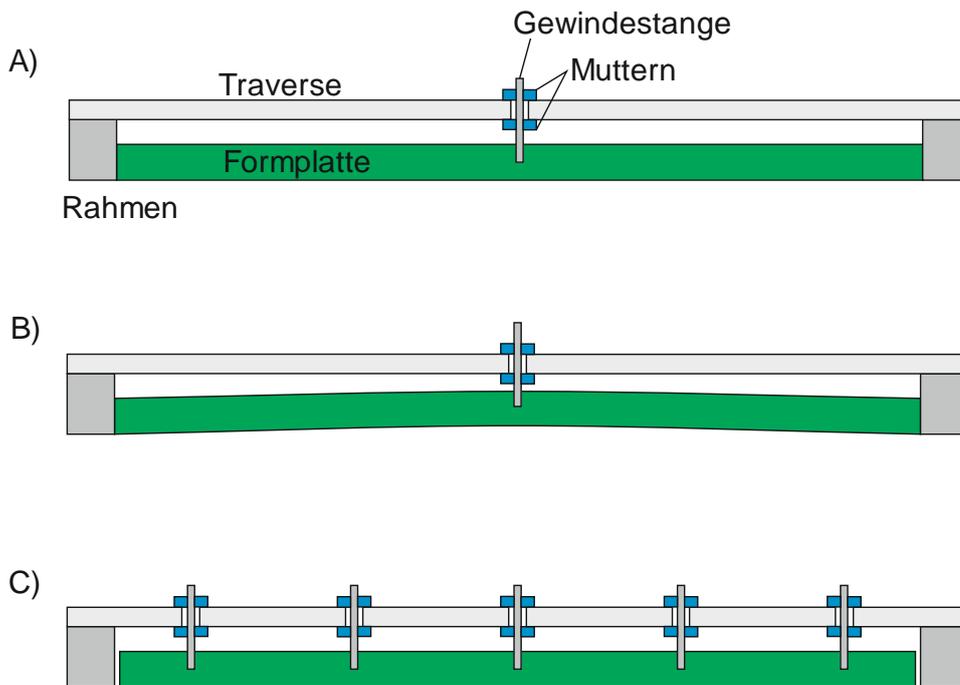


Abbildung 92: Vorrichtung zum Anpassen der Ebenheit der Formplatte

Thermoschock

Wenn nach Stagnation und Leerlaufen das kältere Fluid ohne ausreichende Abkühlung in den aufgeheizten Kollektor einströmt, führt das zu einem »inneren Temperaturschock« (Bestandteil der Solar-Keymark-Prüfungen), der das Kollektormaterial mechanisch belastet. Der Thermoschock wurde mit der FEM simuliert, in einem Worst-Case-Szenario wurde die Kanalinnenseite um 100 K abgekühlt (Elastizitätsmodul $E = 40000 \text{ MPa}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Dabei treten im Beton maximale Zugspannungen bis hin zu ca. 53 MPa an der Oberfläche auf (Abbildung 93). In der Wand werden diese durch Druckspannungen geringerer Höhe kompensiert. Die Zugspannungen können zu Anrissen in der Kanalinnenseite führen. Durch die Anrisse werden die thermisch bedingten Zugspannungen gesenkt, und die Temperaturangleichung über die Zeit lässt die Spannungen weiter sinken, weshalb Durchrisse nicht zu erwarten sind.

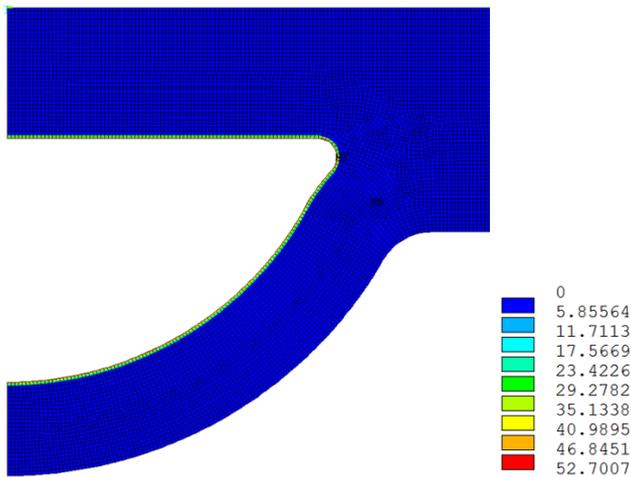


Abbildung 93: Durch Herunterkühlen der Oberfläche um 100 K (Thermoschock in Kanalinnenseite) bedingte Zugspannungen

Wird die Kanalinnenseite von 150 °C auf 20 °C abgekühlt (Wärmekapazität 0,88 kJ/(kg·K), Wärmeleitfähigkeit 2,1 W/(m·K)), sinkt die Oberflächentemperatur an der Kanalausseite innerhalb von 10 Sekunden um ca. 60 K (Abbildung 94). Am höchsten sind die Spannungen in den ersten Sekunden nach dem Einströmen, danach sinken sie mit homogener werdender Temperaturverteilung.

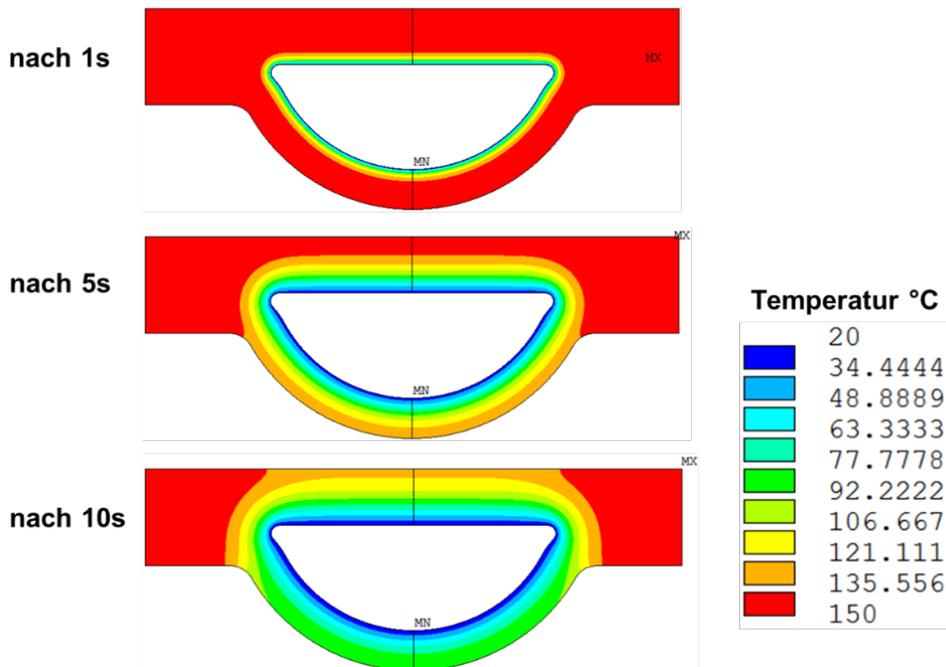


Abbildung 94: Temperaturverteilung beim Abkühlen

Der Einfluss eines Thermoschocks auf die Belastbarkeit des UHPC wurde am KIT an Platten von Spürgin auch experimentell untersucht. Diese wurden auf 150 °C bzw. 280 °C erhitzt und in 20 °C kaltem Wasser abgeschreckt. Die Platten wurden in 20 mm breite Streifen

geschnitten, auf der Prüfmaschine im Drei-Punkt-Biegeversuch (Abbildung 95) bis zum Bruch belastet und optisch auf Risse untersucht. Da sich die Oberflächen der beiden Plattenseiten herstellungsbedingt deutlich unterscheiden, wurde im Versuch auf die Lastrichtung geachtet und zwischen Biegezug auf der glatten bzw. rauen Seite unterschieden.

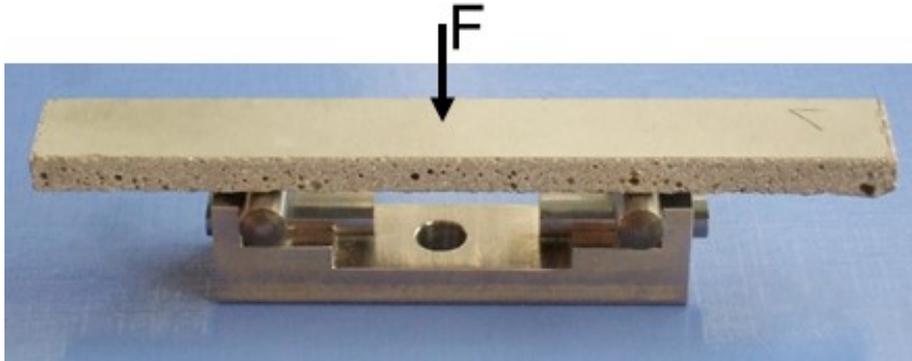


Abbildung 95: UHPC-Probe mit Vorrichtung für Drei-Punkt-Biegeversuch

Anrisse waren bei den abgeschreckten Proben weder mit bloßem Auge noch unter 10fach vergrößernder Lupe sichtbar. Erst unter dem Lichtmikroskop konnten oberflächliche Risse identifiziert werden (Abbildung 96). Dabei wiesen die höher aufgeheizten Proben ($\Delta T = 260 \text{ K}$) mehr und größere Risse auf, und die rauen Seiten zeigten mehr Rissbildungen auf als die glatten.

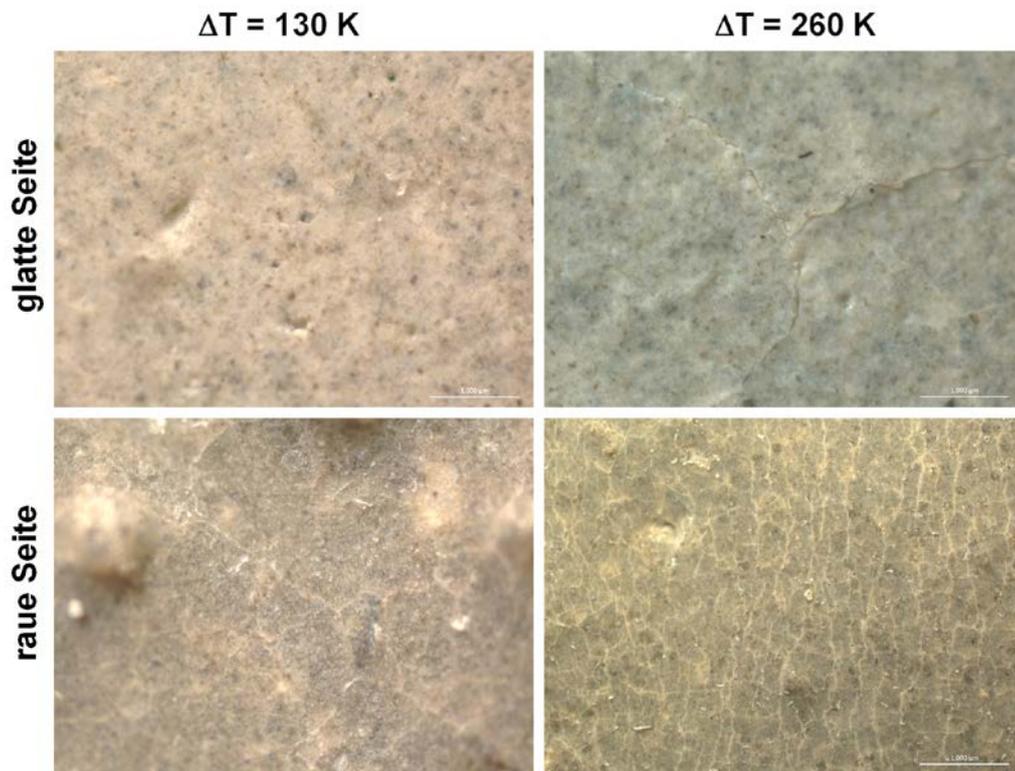


Abbildung 96: Rissbildung an den Oberflächen durch Thermoschock

Abbildung 97 zeigt die ermittelten Biegefestigkeiten. Liegt die glatte Probenoberfläche auf der Zugseite der Biegung, so sind die gemessenen Festigkeiten im Mittel höher als wenn die raue Seite zugbelastet wird. Als Ursache dafür ist neben dem Kerbeinfluss der Rauigkeit auch eine fertigungsbedingte Zunahme von Anzahl bzw. Größe der Poren von der glatten zur rauhen Seite hin denkbar. Signifikante Festigkeitsminderung durch den Thermoschock konnten, entgegen den Erwartungen, nicht festgestellt werden. Für das TABSOLAR®-Konzept stellt sich das positiv dar.

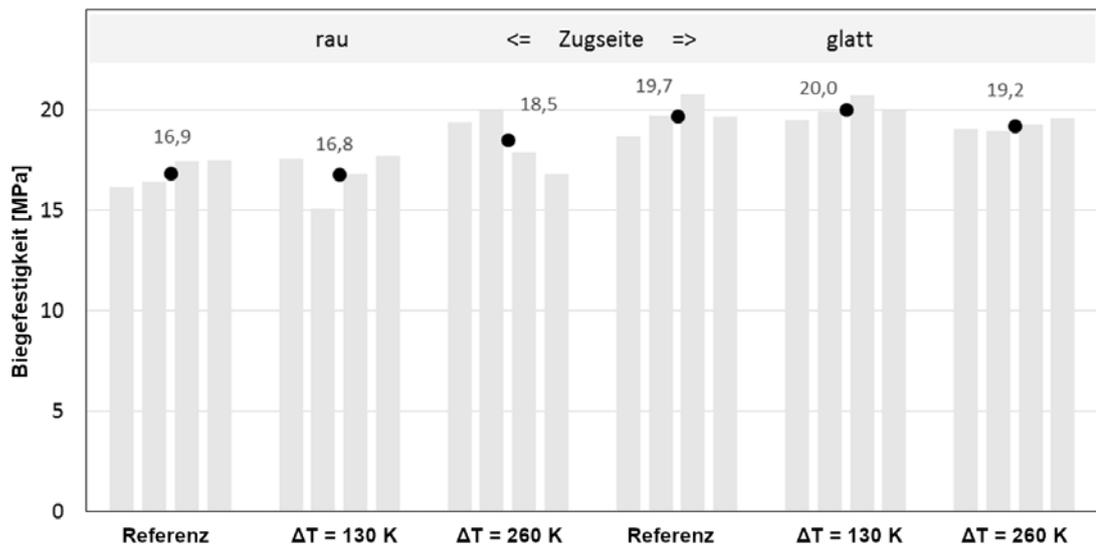


Abbildung 97: Biegefestigkeiten von Referenz- und abgeschreckten Proben

2.3.5 Befestigung von TABSOLAR®-Elementen und Hydraulikverbinder

Befestigung von TABSOLAR®-Elementen an der Fassade mittels Agraffen

Zur Befestigung eines TABSOLAR®-Elements an einer Fassade müssen die Agraffen über den Kanälen auf der Rückseite des TABSOLAR®-Elements liegen. Dies wird für jede Agraffe mit jeweils zwei Z-Profilen bewerkstelligt (Abbildung 98).

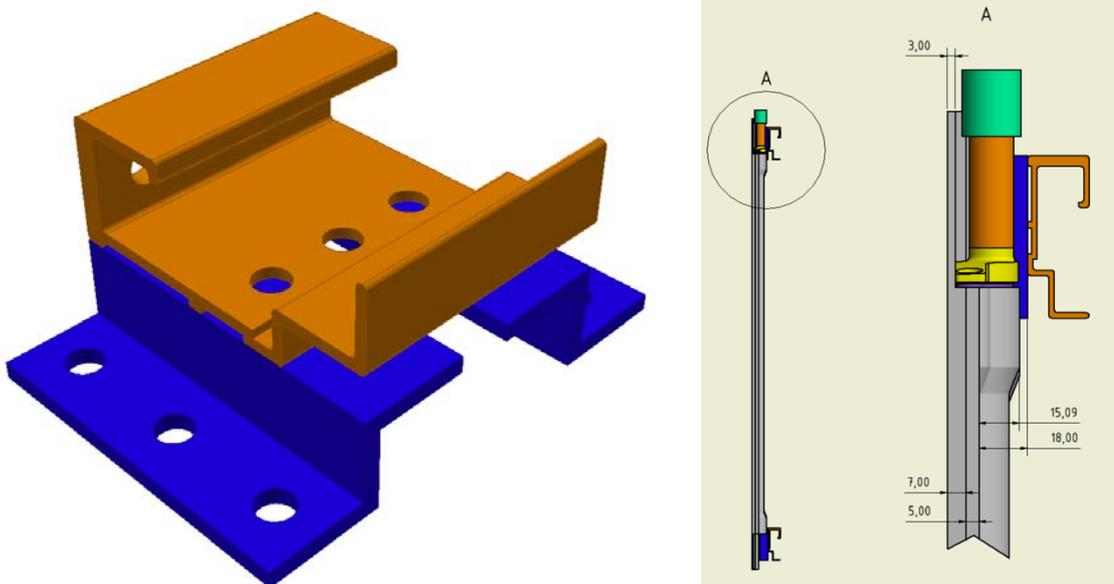


Abbildung 98: Agraffe mit zwei Z-Profilen (links), Seitenansicht TABSOLAR®-Element mit überstehender Agraffe (rechts)

Die Positionen der Agraffen und Sammelkanäle sind aktuell theoretisch so ausgelegt, dass horizontale sowie vertikale TABSOLAR®-Elemente mit demselben Werkzeug hergestellt werden können (Abbildung 99 und Abbildung 100).

Die für die Agraffen notwendigen Bereiche weisen keine Fluidkanäle auf und sind somit thermisch schlecht angebunden. Der Effekt wird bei größeren Elementen geringer, jedoch werden dann eventuell Agraffen in der Mitte des Elements notwendig, um eine sichere Befestigung an der Fassade zu gewährleisten.

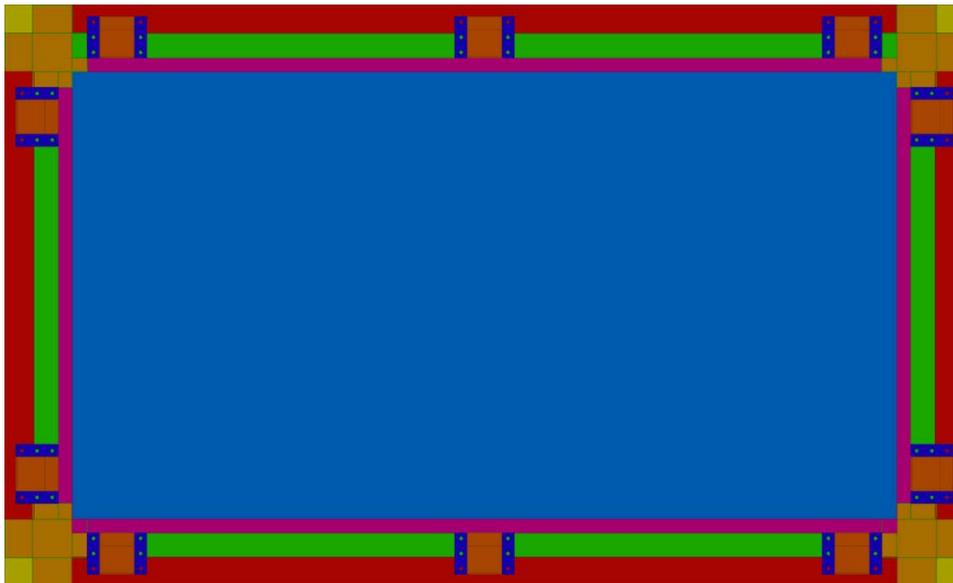


Abbildung 99: Schematische Darstellung; Agraffenpositionen für horizontale und vertikale TABSOLAR®-Elemente

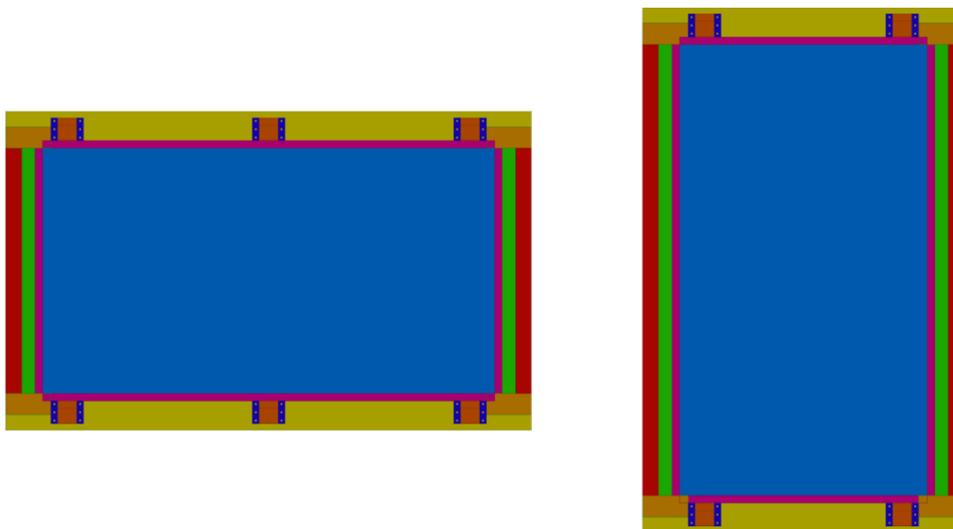


Abbildung 100: Schematische Darstellung; links: horizontales Element, rechts: vertikales Element

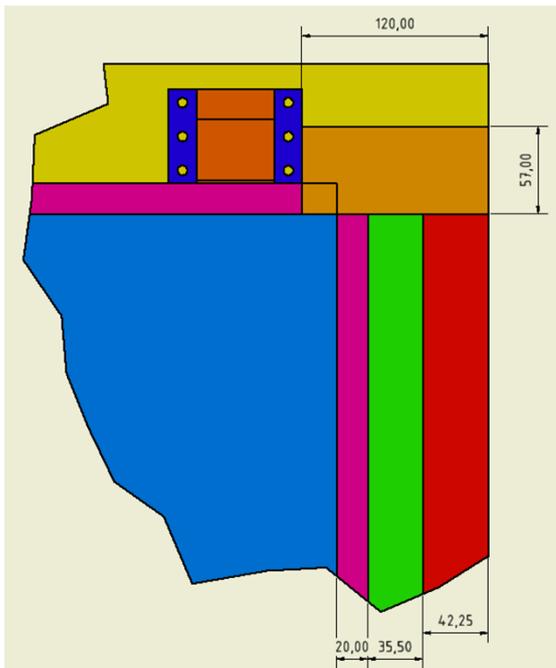


Abbildung 101: Schematische Darstellung der Abmessungen am Rand eines TABSOLAR®-Elements

In Abbildung 101 sind die Abmessungen am Rand eines TABSOLAR®-Elements schematisch dargestellt. Der Rand setzt sich wie folgt zusammen:

1. 20 mm Abstand zwischen FraTherm®-Kanal und Sammelkanal
2. 35,5 mm Breite des Sammelkanals
3. Für den Hydraulikanschluss im UHPC ist aktuell ein Rand von 15 mm vorgesehen, $90 \text{ mm} + 2 \times 15 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$. Die Breite des Hydraulikanschlusses im UHPC ist in Abbildung 68 ersichtlich.
4. Randabstand 42,25 mm ergibt sich aus den vorherigen Abmessungen

Hydraulikverbinder und Einhängen eines TABSOLAR®-Elements an die Fassade

Beim Einhängen der TABSOLAR®-Elemente an die Fassade werden diese untereinander hydraulisch verbunden. Am Fraunhofer ISE wurde dazu ein Konzeptvorschlag erarbeitet (Abbildung 102 bis Abbildung 104).

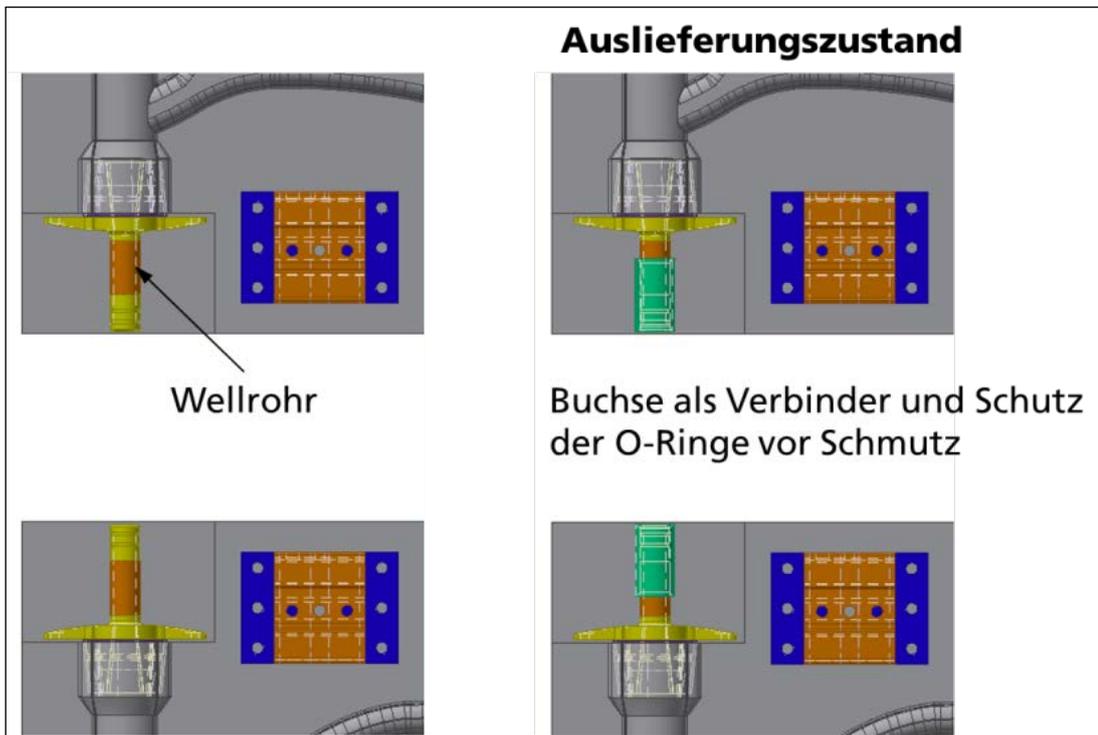


Abbildung 102: Schematische Darstellung; unten: fixiertes TABSOLAR®-Element; oben: einzuhängendes TABSOLAR®-Element

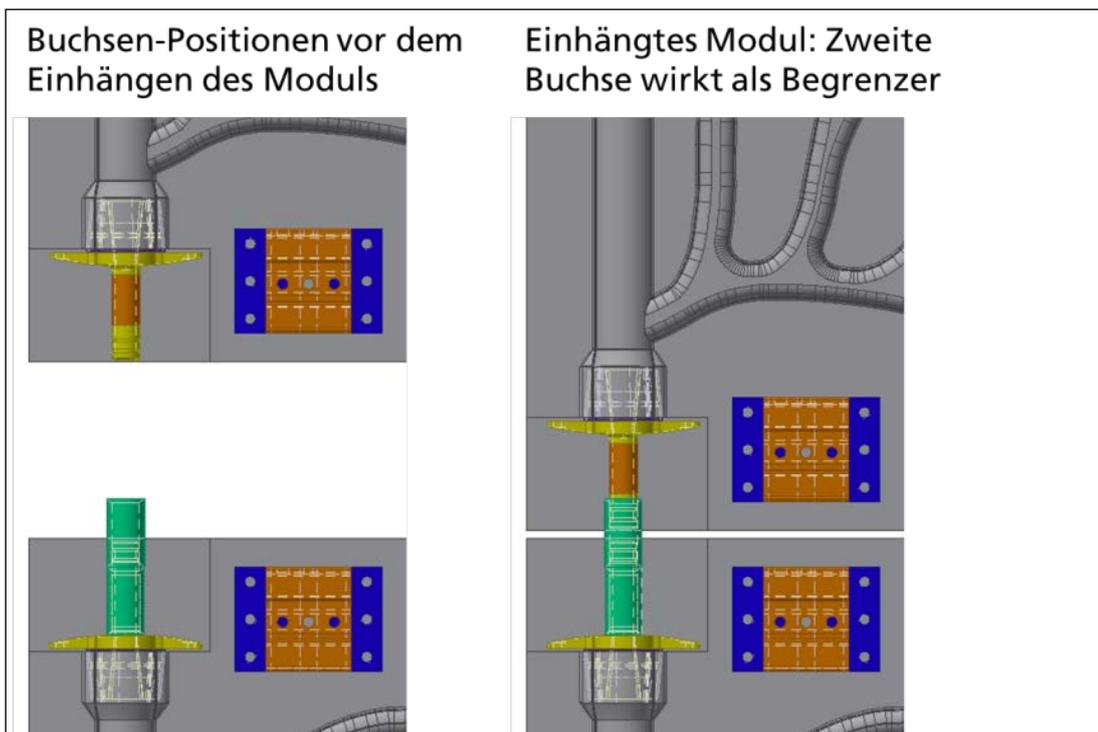


Abbildung 103: Schematische Darstellung; links: Buchsen-Positionen vor dem Einhängen des Moduls; rechts: zwei eingehängte und hydraulisch verbundene TABSOLAR®-Elemente

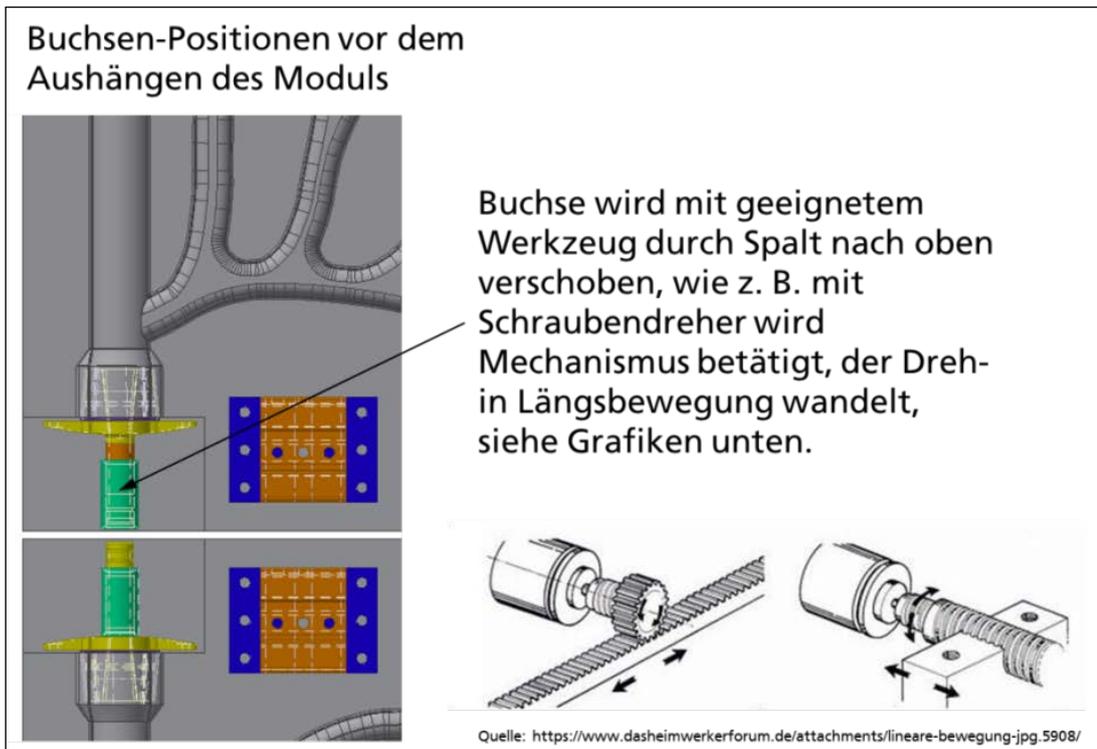


Abbildung 104: Schematische Darstellung; Elementaustausch und Hydraulikverbinder

2.4 Arbeitspaket 4: Herstellung und Charakterisierung von UHPC-Fertigteilen für drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design*

2.4.1 Zusammenfassung

Für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen wurde eine Wendeeinheit auf Basis einer handelsüblichen Hebebühne entwickelt und hergestellt, welche die Basis für zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Rezepturen, Verfahrensparametern sowie Vorrichtungen war.

Zur Herstellung großer TABSOLAR®-Elemente mit Hilfe des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens wurden geeignete Werkzeuge konstruiert und hergestellt. Dabei wurden auch die Schnittstellen für die Hydraulikanschlüsse berücksichtigt.

Eine wesentliche Basis für die Fertigung stellte die Entwicklung und Herstellung geeigneter UHPC-Mischungen dar. In zahlreichen Schritten wurden die Frischbetoneigenschaften, z. B. die Fließgrenze, passend für den Membran-Vakuumtiefziehprozess eingestellt.

Zunächst konnten erfolgreich mehrere ca. 1 m² große TABSOLAR®-Element hergestellt werden. Zur Überprüfung der Kanalquerschnitte wurden sie aufgetrennt. Im weiteren Projektverlauf traten jedoch zunehmend Schwierigkeiten bei der Fertigung auf – entweder entstanden verschlossene Kanäle oder mangelhafte Verbindungen der beiden Bauteilhälften, so dass schließlich kein TABSOLAR®-Element für weitere Vermessungen hergestellt werden konnte. Es wurde erkannt, dass die Einfüllmenge an Frischbeton in die Schalung nur bedingt händisch erfolgen kann, da dieses zu hohen Einflüssen und Schwankungen unterliegt. Daher wird zukünftig eine teilautomatisierte Herstellung von TABSOLAR®-Elementen empfohlen, um deren Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Um dennoch durchströmbare Kanalstrukturen zu erhalten, wurden Versuche zu zwei Ansätzen durchgeführt, die das bestehende Membran-Vakuumtiefziehverfahren erweitern. Mit einem konnte bereits ein großes durchströmbares TABSOLAR®-Element hergestellt werden, mit dem anderen ein kleines Muster im Labormaßstab.

Im Zuge der Erarbeitung von Lösungen zur Fassadenintegration von TABSOLAR®-Elementen wurden mit aktuellem Fokus auf das Fassadensystem der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten unter Betrachtung der TABSOLAR®-Produktfamilien entwickelt. Für die Verglasung der Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Economy* wurden verschiedene Konzepte vorgeschlagen.

Während des gesamten Vorhabens wurden unterschiedliche Muster angefertigt und so auch auf Messen (BAU 2017, BAU 2019) und im Nachgang im Showroom des Priedemann Facade-Lab ausgestellt. Auf der Messe BAU 2017 wurden kleine Muster der drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design* präsentiert, auf der Messe BAU 2019 waren große Exponate der Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Design* sowie ein Handmuster zu sehen. Die Resonanz der Messebesucher war sehr gut.

2.4.2 Konstruktion und Bau einer Fertigungsanlage

Über die Laufzeit des Projekts wurde eine Wendeeinheit erarbeitet, welche die Basis für zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Rezepturen, Verfahrensparametern sowie Vorrichtungen war (siehe Abbildung 105, Abbildung 106).

Der Aufbau der Wendeeinheit basiert auf einer handelsüblichen Hebebühne. Für die Wendeeinheit wurden ein Außenrahmen und ein Innenrahmen gebaut. Der Außenrahmen

wurde an der Hebebühne mit Gewindeschrauben befestigt, über diese Gewindeschrauben kann der Rahmen genau justiert werden.

Der Innenrahmen wurde mittig mit einer Drehachse befestigt. Um eine 180°-Drehung einzuhalten, wurde seitlich ein Anschlag montiert. Für die Aufnahme der Werkzeuge wurden seitlich vier Bolzen angebracht. Anders als ursprünglich geplant wurde entschieden, keine fahrbare Wendeeinheit zu bauen, da die Fahrt mit unter dem Vakuum angezogenen UHPC zu viel Vibration auf das Werkstück übertragen würde. Somit wird jetzt mit dem angezogenen UHPC-Teil nach oben gefahren, und das Gegenstück wird über eine Rollbahn unter das einzutauchende Werkstück gebracht. Abbildung 105 zeigt die Konstruktion der Wendeeinheit, Abbildung 106 deren Realisierung.

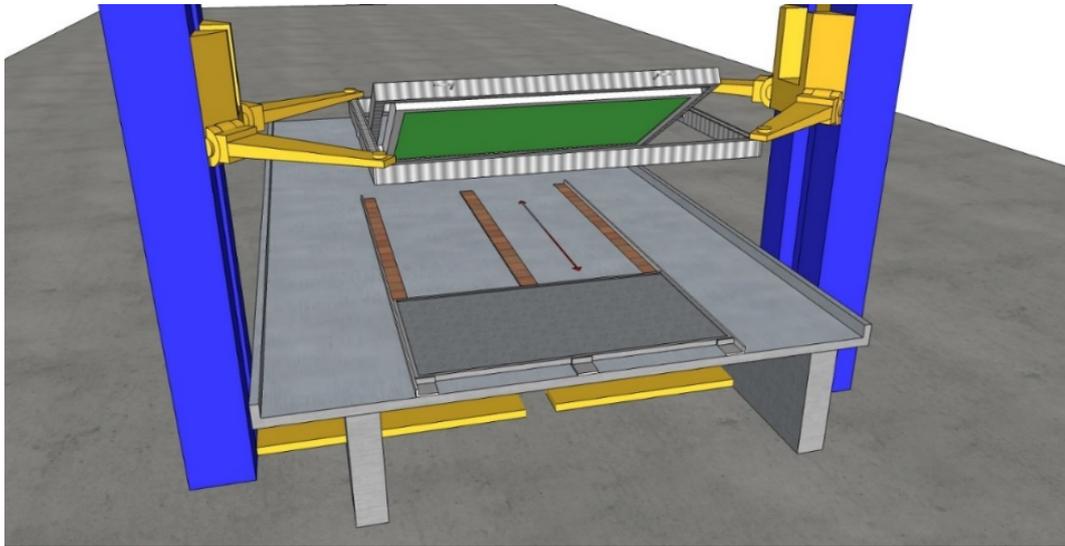


Abbildung 105: Konstruktion der Wendeeinheit



Abbildung 106: Realisierung der Wendeeinheit

2.4.3 Auslegung und Fertigung von Werkzeugen

Zur Herstellung großer TABSOLAR®-Elemente wurde eine zunächst gefertigte dreiteilige FracTherm®-Formplatte durch das Fraunhofer ISE zu einer zusammengeklebten Formplatte mit funktionsrelevanten Bauteilen zur Abdichtung für das Membran-Vakuumtiefziehverfahren abgeändert und von Spürgin gefertigt.

Die Evakuierungsräume sind jeweils in den Formplattenteilen untergebracht, was eine simple Holzplatte als Grundplatte ermöglicht (Abbildung 107 und Abbildung 108). Abbildung 109 zeigt den Außenrahmen für die Wendeeinrichtung und die Befestigung der Silikonmembran.

Es erfolgten unterschiedlichste Fertigungsversuche unter Variation der Rezeptur und Prozessparameter. Weiterhin wurde kontinuierlich die Vorrichtung modifiziert.

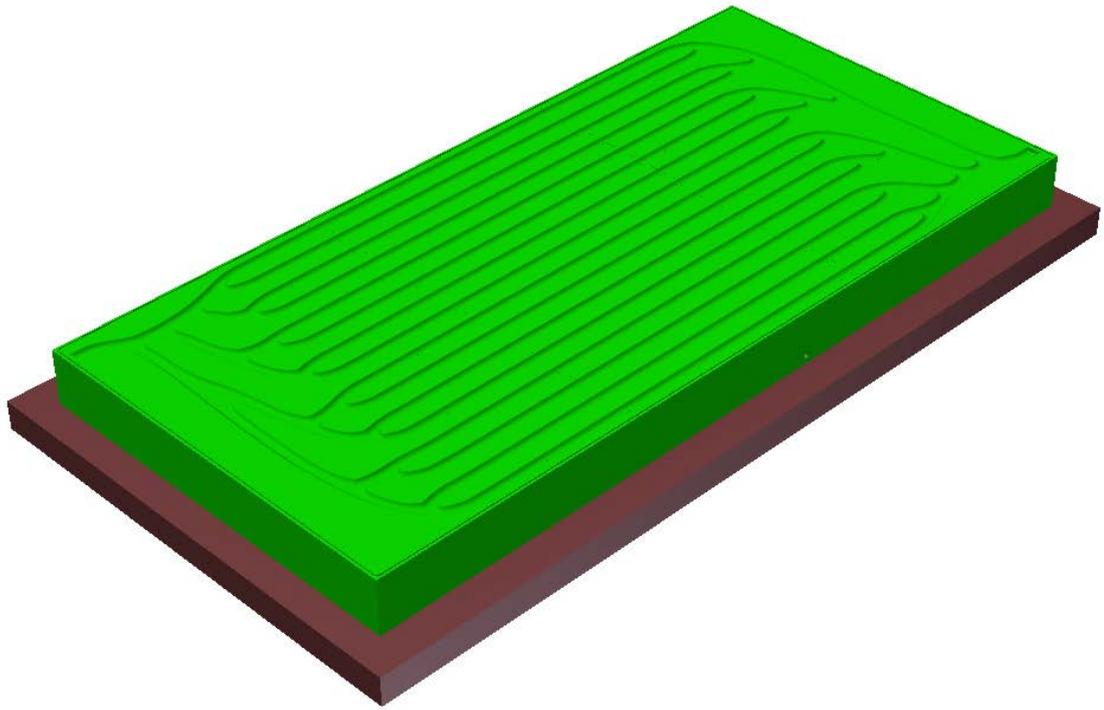


Abbildung 107: CAD-Zeichnung der abgeänderten und zusammengeklebten, dreiteiligen FracTherm®-Formplatte mit Holz-Grundplatte

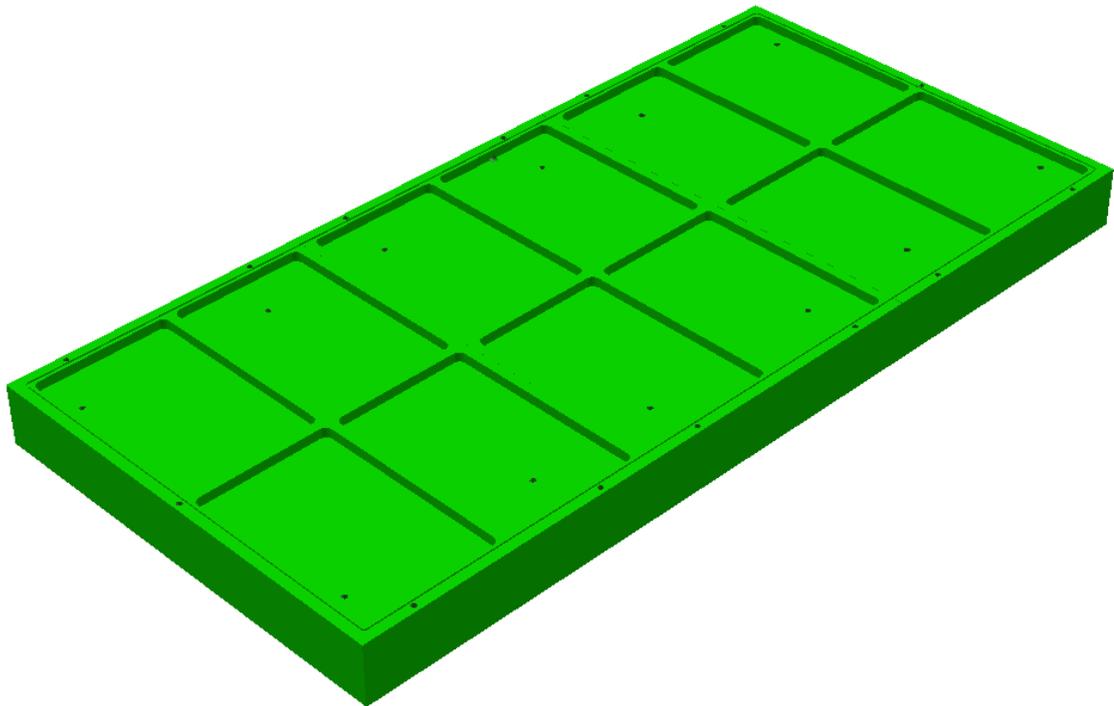


Abbildung 108: CAD-Zeichnung der Evakuierungsräume an der Unterseite der abgeänderten und zusammengeklebten, dreiteiligen FracTherm®-Formplatte

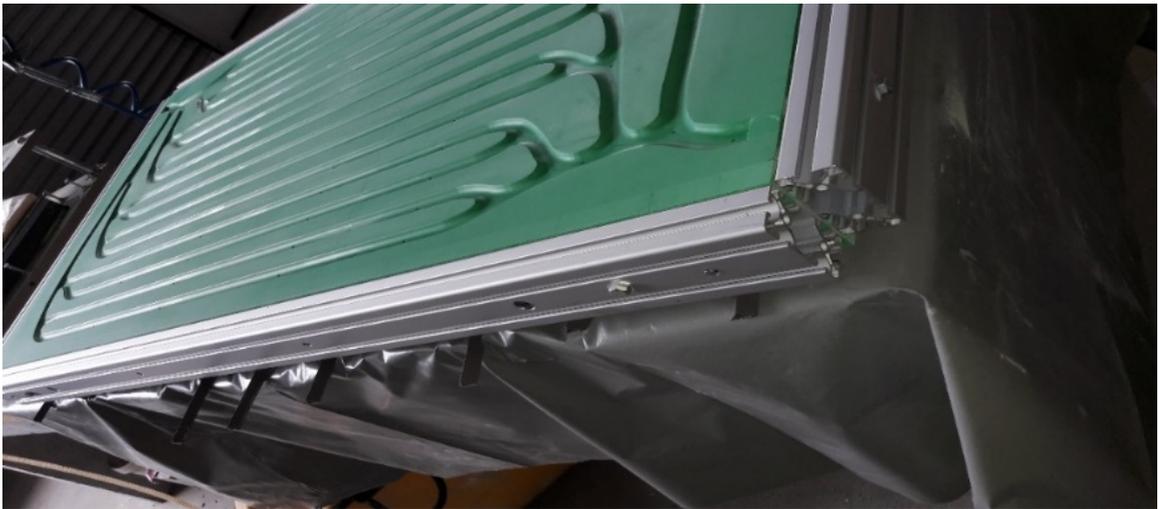


Abbildung 109: Außenrahmen für die Wendeeinrichtung und die Befestigung der Silikonmembran

Werkzeuge für die Fertigung großer TABSOLAR®-Elemente mit Sammelkanälen, Hydraulikanschluss- und Fassadenbefestigungsmöglichkeiten

Für die Fertigung von TABSOLAR®-Elementen mit Sammelkanälen, Hydraulikanschluss- und Fassadenbefestigungsmöglichkeiten (Abbildung 110) wurde ein neues Herstellungswerkzeug konstruiert (Abbildung 116). Die Formplatte aus dem bisherigen Herstellungswerkzeug wurde hierzu übernommen und modifiziert (Abbildung 111 und Abbildung 112).

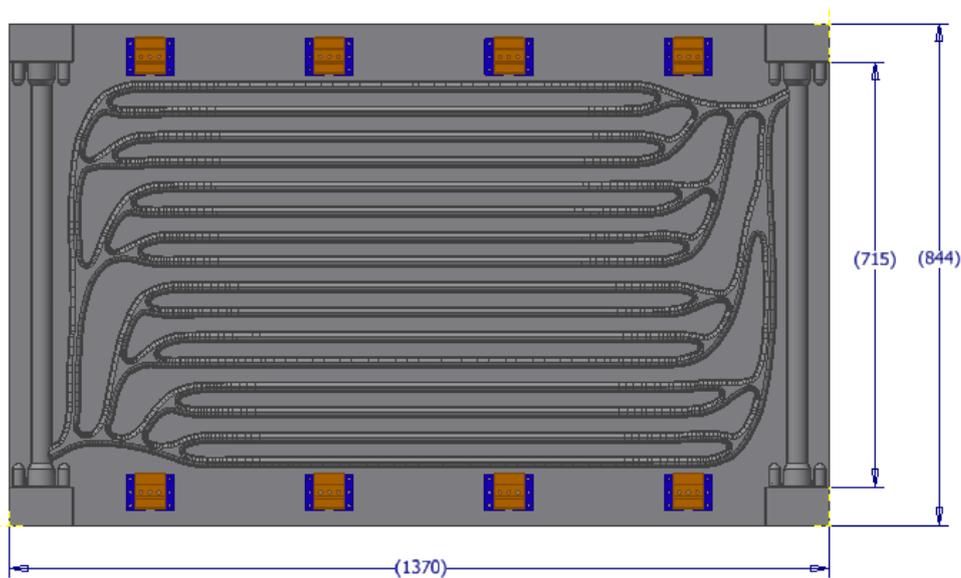


Abbildung 110: Geplantes TABSOLAR®-Element mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Agraffen zur Befestigung an der Fassade

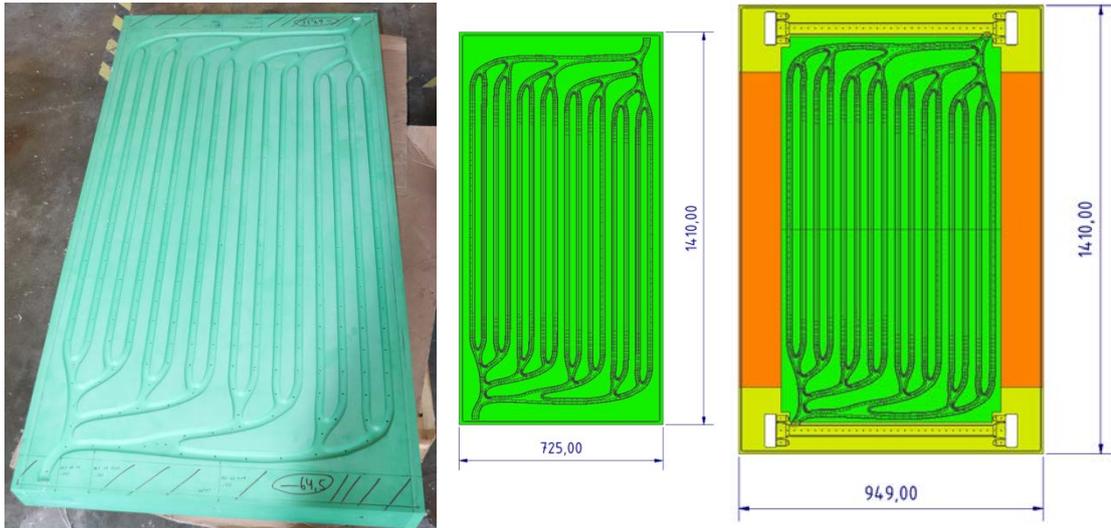


Abbildung 111: Bisherige Formplatte (links), Abmessungen der bisherigen Formplatte (Mitte), Abmessungen der geplanten Formplatte (rechts)

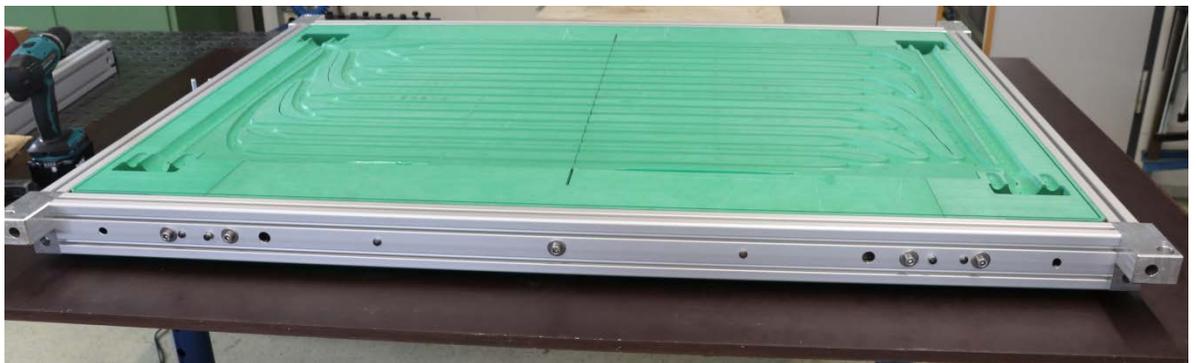


Abbildung 112: Formplatte für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Platz für die Fassadenbefestigungen

Die Spannung der Tiefziehmembran wurde ebenfalls abgeändert und wird durch einen Spannrahmen gewährleistet (Abbildung 113).



Abbildung 113: Membranspannrahmen

Die Schalung der ebenen Platte wurde ebenso neu gestaltet (Abbildung 114) und bildet die Außenmaße der TABSOLAR®-Elemente (Abbildung 110).



Abbildung 114: Schalung der ebenen Platte

Die Hydraulikanschlussmöglichkeiten am TABSOLAR®-Element werden durch Abformung hergestellt, und die Befestigung eines Hydraulikanschlusses am TABSOLAR®-Element erfolgt mittels Siebdübeln (Abbildung 115).

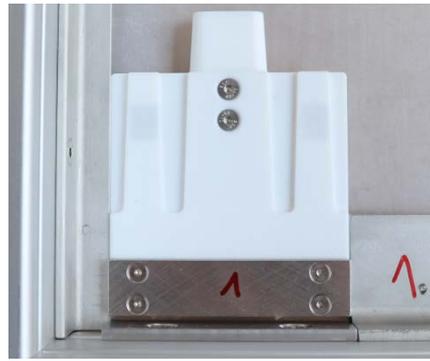
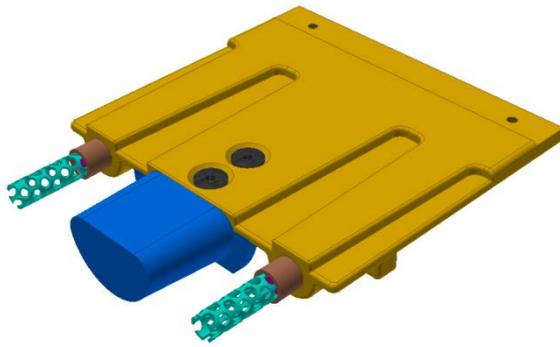


Abbildung 115: Einlegeplatte mit Hydraulikanschlussabformung und Siebdübeln (links: CAD-Zeichnung, rechts: Foto)

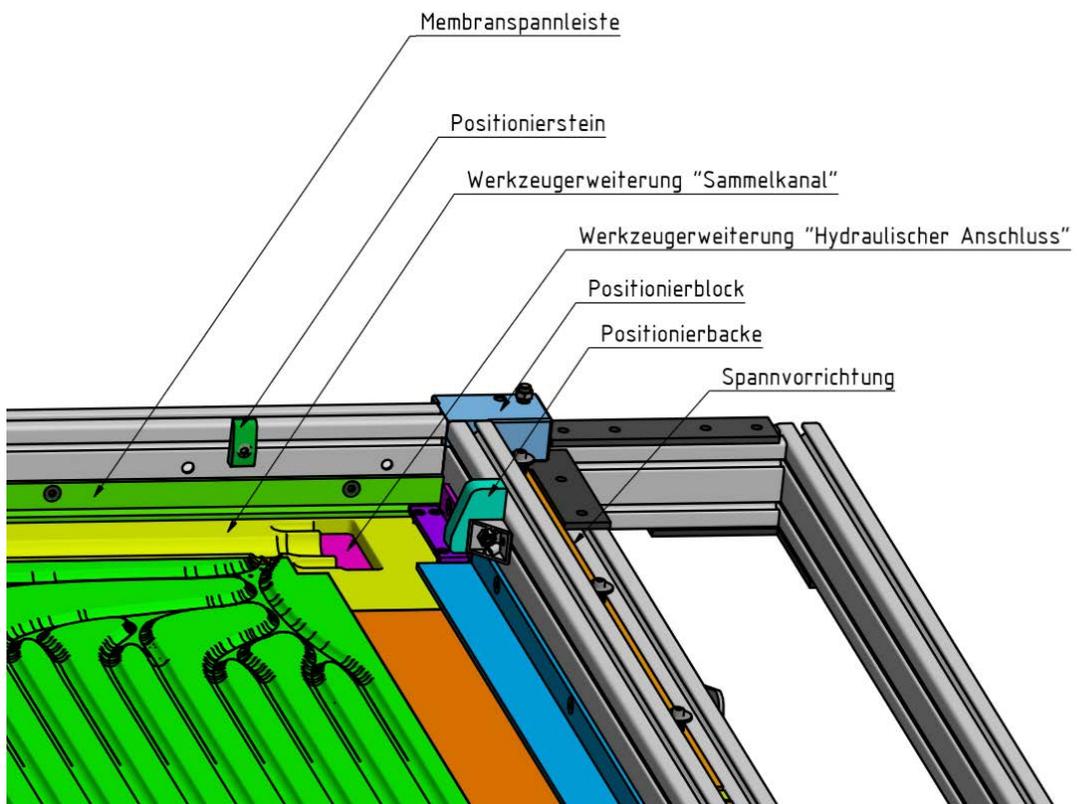


Abbildung 116: Ausschnitt des geplanten Werkzeugs für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Platz für die Fassadenbefestigungen

Am Fraunhofer ISE wurde das Membran-Vakuumtiefziehwerkzeug so abgeändert, dass nun UHPC-Elemente mit Sammelkanälen und Hydraulikanschlussmöglichkeiten hergestellt werden können (siehe Abbildung 117). Das Werkzeug wurde am 13.11.2019 zu Spürgin transportiert und dort aufgebaut.

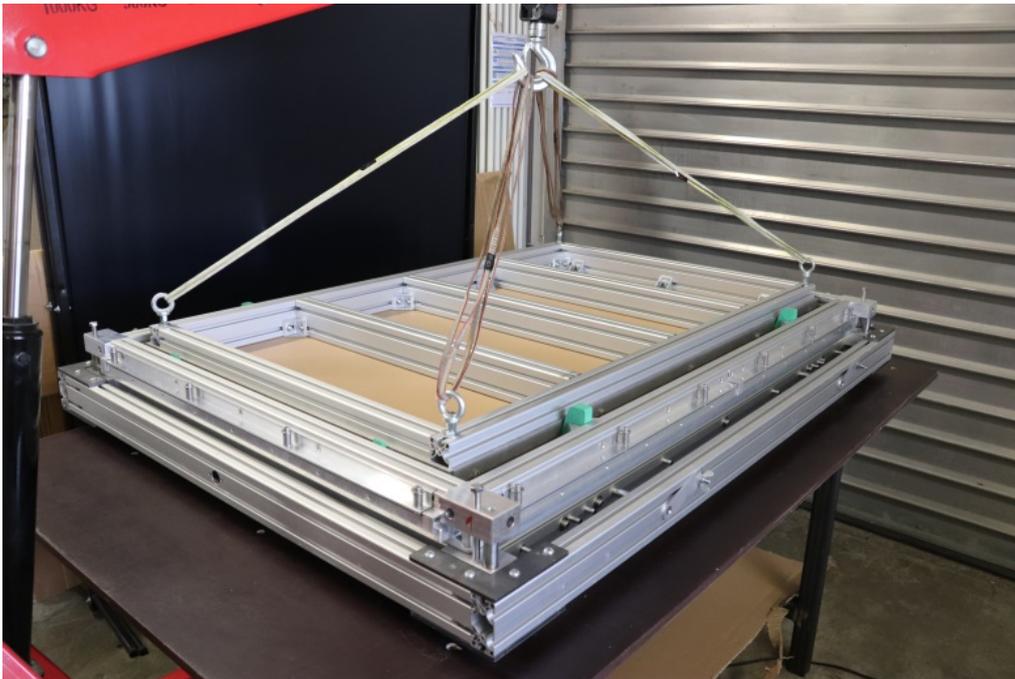


Abbildung 117: Membran-Vakuumtiefziehwerkzeug zur Herstellung von UHPC-Elementen mit Sammelkanälen und Hydraulikanschlussmöglichkeiten

Vor dem Transport zu Spürgin wurden mit dem Membran-Vakuumtiefziehwerkzeug Tiefziehversuche im Bereich der Hydraulikanschlussabformung mit einem Pre-mix von G.tecz durchgeführt (Abbildung 118). Dieser Pre-mix weist allerdings nicht die Hochleistungseigenschaften der UHPC-Mischung auf, die für die Versuche bei Spürgin entwickelt wurde, sondern dient lediglich grundlegenden Versuchen, was bei der Interpretation der Versuche zu berücksichtigen ist.



Abbildung 118: Versuchsfläche für Tiefziehversuche am Fraunhofer ISE im Bereich der Hydraulikanschlussabformung (links), aushärtendes Pre-mix-Element (rechts)

Als Trennmittel zwischen den Werkzeugoberflächen und dem Pre-mix wurde Gesteinsmehl eingesetzt.

Nach mehreren Versuchsdurchführungen wurde im Bereich der Hydraulikanschlussabformung ein durchströmbares Element aus Pre-mix mit Sammelkanal und Hydraulikanschlussmöglichkeit hergestellt (Abbildung 119 bis Abbildung 121).



Abbildung 119: Ausgeschaltetes durchströmbares Element aus Pre-mix mit Sammelkanal und Hydraulikanschlussmöglichkeit



Abbildung 120: Hydraulikanschlussmöglichkeit über Anschlusskonus und eingebettete Siebdübel

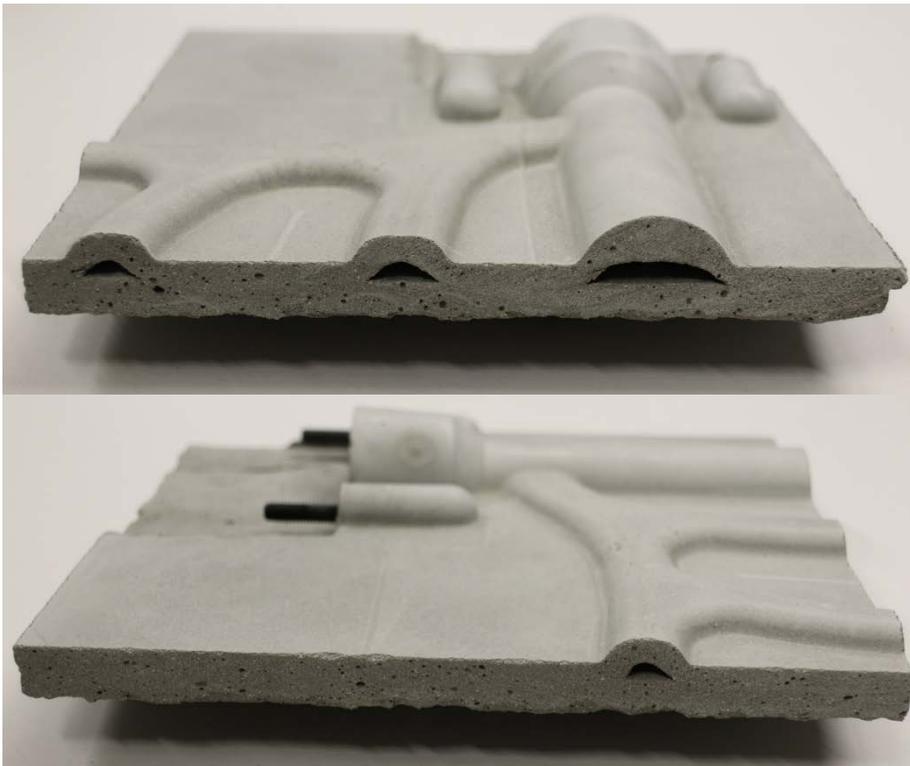


Abbildung 121: Ausgeprägte Fluidkanäle der FracTherm®-Struktur und des Sammelkanals

Wie auch die theoretischen Berechnungen aufzeigen, wurde bei den Versuchsdurchführungen nach dem Tiefziehen zusätzlicher Pre-mix unter das Anschlusseinlegeeteil und über die Siebdübel hinzugefügt.

Dichtigkeitsprüfungen und ein Druckversuch wurden mit dem Hydraulikanschluss (Abbildung 122) durchgeführt.



Abbildung 122: Hydraulikanschluss: einzelne Bauteile (links), montiert (rechts)

Eine Druckprüfung am Anschlussbereich eines Pre-mix-Elements mit verschlossenen Kanälen (Abbildung 123) zeigte auf, dass der Anschlusskonus aus Pre-mix eine Druckstabilität von 4 bar aufweist. Es ist damit zu rechnen, dass ein Element aus der für Spürgin entwickelten UHPC-Mischung eine höhere Druckstabilität besitzt.

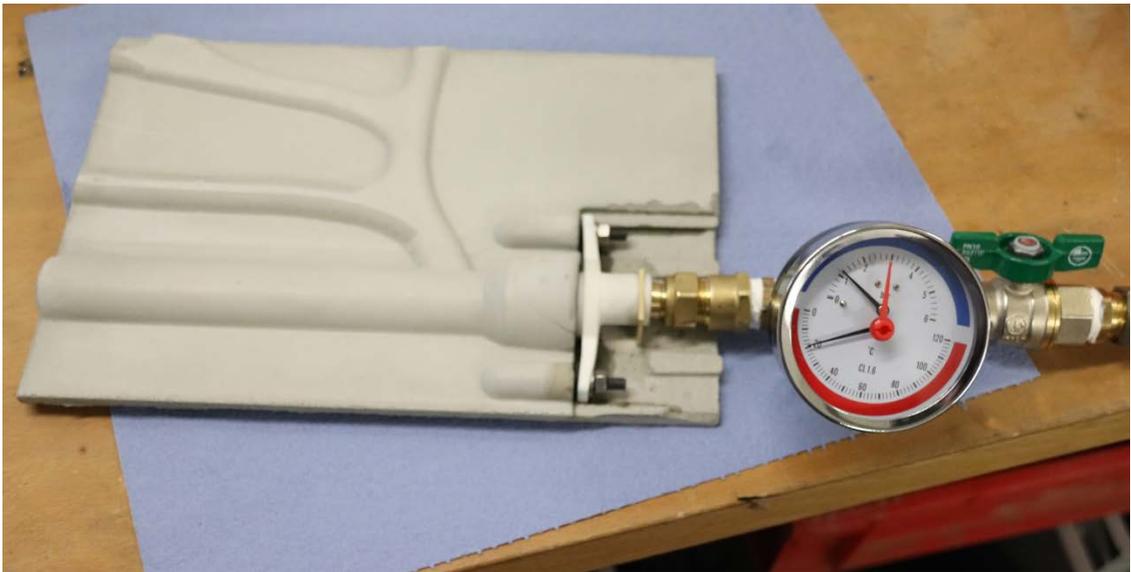


Abbildung 123: Druckbeständigkeitsprüfung am Anschlussbereich eines Pre-mix-Elements

Eine Dichtigkeitsprüfung des Hydraulikanschlusses in einem Pre-mix-Block zeigte auf, dass der Hydraulikanschluss bis 6 bar wasserdicht ist, siehe Abbildung 124. Jedoch ist zu vermuten, dass der Pre-mix und/oder der Polymer-Hydraulikanschluss Wasser aufnehmen, da der Druck leicht abnahm, jedoch keine offensichtliche Leckage festgestellt werden konnte.



Abbildung 124: Dichtigkeitsprüfung des Hydraulikanschlusses im Pre-mix-Block

2.4.4 Entwicklung und Herstellung von UHPC-Mischungen

Verarbeitung des Frischbetons

Die Verarbeitbarkeit des Frischbetons hat einen wesentlichen Einfluss auf die Güte herzustellender TABSOLAR®-Elemente. Hierbei sind ausgeprägte Fließeigenschaften des Frischbetons bei der Herstellung der Sichtbetonoberflächen erwünscht, um die benötigte Verarbeitbarkeit und Entlüftung zu gewährleisten. Diese Eigenschaften sind zu einer genauen und gewünschten Abbildung der Sichtbetonoberfläche erforderlich und dienen zur Minimierung des Strahlungsemissionsgrads. Insbesondere die Entlüftung des Frischbetons trägt zur Sicherung der charakteristischen Eigenschaften des UHPC bei. Durch die Einstellung der Fließfähigkeit des Frischbetons darf die Fließgrenze nicht negativ beeinträchtigt werden. Eine signifikante Änderung der Fließgrenze hätte einen nachteiligen Einfluss auf das Frischbetonverhalten beim Tiefziehen des Frischbetons. Ist die Fließgrenze zu niedrig bzw. zu hoch eingestellt, kann der Frischbeton während des Tiefziehprozesses in die Kanalstruktur abfließen, oder es treten Risse in den Flanken der Kanäle auf. Beide Phänomene führen zu einer Reduktion der maximal aufnehmbaren Spannungen und zu einer Undichtigkeit des Gesamtsystems. Gleiches gilt für Luftporen, welche im Beton verbleiben.

Abbildung 125 zeigt Kanalquerschnitte, bei denen unterschiedliche Frischbetonkonsistenzen untersucht wurden.



Abbildung 125: Kanalstruktur mit inhomogener Querschnittsdicke der Kanalwandung (links), Rissbildung im Frischbeton beim Tiefziehen aufgrund einer erhöhten Fließgrenze (rechts)

Die Einstellung des Frischbetonkonsistenz und insbesondere der Fließgrenze erfolgt über die Abstimmung der Mischungszusammensetzung. Zum Vergleich wurden die Frischbetoneigenschaften mit Hilfe eines üblichen Hägermann-Ausbreittischs untersucht. Dabei wird zunächst das Setzfließmaß eines frei fließenden Frischbetons mit definiertem Beton-

volumen bestimmt. Anschließend wird mit Hilfe von 15 Verdichtungsschlägen ein Ausbreiten des Betonkuchens bewirkt und nach Beendigung das Ausbreitmaß bestimmt.

Da die Konsistenzregelung des Frischbetons von der Qualität und Dosierung bestimmter Ausgangsstoffe abhängt, wurde eine aktuelle Charge eines spezifischen Ausgangsstoffs im Vergleich zu einer Referenz untersucht. Wie bereits beschrieben wurde für die Untersuchung des Frischbetons ein Vergleich der Setzfließ- und Ausbreitmaße durchgeführt. Bei der Herstellung des Frischbetons wurde ein spezifisches Mischregime eingehalten. In Tabelle 8 sind die untersuchten Mischungsvariationen und in Tabelle 9 die bestimmten Frischbetonergebnisse dargestellt.

Tabelle 8: Mischungsvariation

	Beschreibung – Variation Zusatzstoff
Mischung 1	Referenz
Mischung 2	Verdopplung Dosiergehalt
Mischung 3	Referenzmenge mit aktueller Produktionscharge
Mischung 4	Verdopplung Dosiergehalt mit aktueller Produktionscharge

Tabelle 9: Frischbetoneigenschaften von Kontrollmischungen

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Setzfließmaß [mm]	250	115	245	115
Ausbreitmaß [mm]	300	160	295	160
Frischbetontemperatur [°C]	25	26	26	26

Wie in Tabelle 9 dargestellt sind die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen der korrespondierenden Mischungszusammensetzungen 1 und 3 sowie 2 und 4 nahezu deckungsgleich. Der Unterschied des Setzfließ- und Ausbreitmaßes zwischen Mischung 1 und Mischung 3 kann durch die erhöhte Frischbetontemperatur der Mischung 3 verursacht sein, welche sich durch das Aufheizen des Mixers infolge der Nutzung ergibt. Aufgrund der bestimmten Messwerte kann von einer Vergleichbarkeit der verschiedenen Lieferchargen ausgegangen werden. Eine Vergleichbarkeit des Zusatzstoffs ist wichtig für die Reproduzierbarkeit der Frischeigenschaften und dient der Qualitätssicherung des Endprodukts.

Neben dem vergleichenden Austausch des Zusatzstoffs und Anpassung des Dosiergehalts wurden weiter verschiedene Dosiergehalte getestet, um den Einfluss des Zusatzstoffs dar-

zustellen. In Abbildung 126 sind Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Dosiergehalten des Zusatzstoffs dargestellt.



Abbildung 126: Frischbeton mit geringer (links), mittlerer (Mitte) und ausgeprägter (rechts) Fließgrenze

Wie aus den Abbildungen ersichtlich, können die Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit der Bedürfnisse eingestellt werden.

Weiterführende Mischversuche von G.tecz und Spürgin

Bei Spürgin wurden erste Mischungsanpassungen durchgeführt. In weiterführenden Versuchen sowie während des Projekttreffens am 27/28.9.2017 wurden große TABSOLAR®-Elemente hergestellt. Im Rahmen dieser Versuche konnten erfolgreich Kanalstrukturen hergestellt und abgebildet werden.

Während der Versuche konnte festgestellt werden, dass beim Einfüll- und Einwendeprozess der Frischbetons bzw. der Schalungshälften auf eine exakte Einfüllmenge des Frischbetons zu achten ist. Mehr- oder Mindermengen an eingefültem Frischbeton können zum Verschließen der Kanalstrukturen oder zu einer verminderten Kontaktfläche der Bauteilhälften und somit zu Verbundproblem führen. Bedingt durch Umgebungseinflüsse kann es während des Herstellungsprozesses oder der Frischbetonverarbeitung zu Wartezeiten zwischen dem Einfüllen des Frischbetons in die Schalungshälften und dem Einwenden derselbigen kommen. Hierbei kann die Frischbetonoberfläche austrocknen, wodurch der Verbund zwischen den Schalungshälften beeinträchtigt wird. Um ein Austrocknen der Frischbetonoberfläche zu hemmen, kann die Umgebungsfeuchte angehoben werden, indem die Frischbetonoberfläche mit einem feuchten Handtuch abgedeckt wird.

Von einer übermäßigen Befeuchtung bzw. der Ansammlung von Wasser und der Bildung von Wasserpfützen auf der Frischbetonoberfläche ist in jedem Fall abzusehen, da dadurch eine Veränderung des oberflächennahen w/z-Werts eingestellt wird und sich dieser negativ auf die Verbundeigenschaften der Bauteilhälften auswirkt und dies die Bildung einer Trennschicht begünstigt.

Mit der Adaption der Mischungsrezeptur auf die Gegebenheiten bei Spürgin durch G.tecz konnten erste großformatige TABSOLAR®-Elemente mit Erfolg hergestellt werden.

Lagenverbund der gefügten Bauteilhälften

Der Lagenverbund der beiden frisch in frisch eingewendeten Bauteilhälften hat einen entscheidenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des hergestellten Betonbauteils. In durchgeführten Untersuchungen hat sich bereits frühzeitig gezeigt, dass die Verbundeigenschaften von der Wartezeit zwischen dem Einfüllen der Schalung bis zum Einwenden der Bauteile abhängen. Bei fortschreitender Wartezeit evaporiert zunächst Wasser aus den randnahen Betonschichten. Dabei trocknet der Frischbeton oberflächlich aus – der Schichtenverbund ist geschwächt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bauteilhälften innerhalb von 15 Minuten nach dem ersten Aufbringen des Frischbetons ineinander gewendet werden müssen, da die Verbundfestigkeit anschließend signifikant beeinträchtigt wird und sich die Schichten bereits beim Sägen der Proben trennen. Hierzu wurden bei G.tecz Prüfkörper hergestellt, welche aus zwei Schichten bestehen, die nach definierten Zeitabständen gefügt wurden und den Herstellungsprozess abbilden. Die hergestellten Prüfkörper wurden am KIT hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften überprüft (siehe 2.3.4). Abbildung 78 stellt untersuchte Prüfkörper dar. In der Abbildung ist links die Trennfläche innerhalb der Fügefläche deutlich zu erkennen. Nach Angaben der Festigkeitsuntersuchungen am KIT konnte kein signifikanter Festigkeitsabfall innerhalb Proben mit einer Fügezeit der Verbundflächen bis 15 min gemessen werden. Probekörper mit einer längeren Offenzeit vor dem Fügen trennen sich in der Verbundebene bereits bei geringer Krafteinwirkung.

Generell und zur Verlängerung der Fügezeit sowie zur Sicherung des Lagenverbunds ist ein Austrocknen der Betonoberfläche zu vermeiden und die Fügezeit zu minimieren. Versuche von G.tecz haben gezeigt, dass ein Aufbringen eines Wassernebels zu lokalen Schwankungen hinsichtlich der Auftragsmenge führt. In ungünstigen Fällen bewirkt die oberflächliche Wasseranreicherung eine erhöhte lokale Migration von Wasser in den Frischbeton und somit zu einer ungewollten Manipulation des w/z-Werts. Diese lokale Veränderung des w/z-Werts beeinträchtigt die Festigkeit, Dauerhaftigkeit, den Lagenverbund sowie die Dichtigkeit des Betonbauteils.

Das geeignete und zu empfehlende Verfahren ist, ein feuchtes, ausgewrungenes Baumwolltuch auf die frische Betonoberfläche aufzulegen, um ein zeitweises Austrocknen des Frischbetons zu reduzieren.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der besseren Kontrolle des freien Wassers, welches sich hierbei nicht lokal ansammeln kann. Durch das Tuch kann der Feuchtigkeitshaushalt für einen Zeitraum gehalten werden. Im Bedarfsfall wird zunächst Wasser aus dem Tuch an die Umgebungsluft abgegeben und nicht aus dem Frischbeton.

Überarbeitung Mischungsrezeptur

Wie bereits dargestellt sind die Betoneigenschaften von verschiedenen Faktoren abhängig und beeinflussen die Betonqualität. Als Einflussfaktoren sind hierbei die Eigenschaften und Zusammensetzung der Einzelstoffe, der Temperatur, des Mixers und der Mischintensität, der Verarbeitung sowie weiterer Faktoren zu nennen. Um Einflussgrößen zu untersuchen, wurden bei G.tecz zunächst Vergleichsuntersuchungen hinsichtlich unterschiedlicher Ausgangstofflieferungen der Firma Spürgin durchgeführt. Dabei wurden einzelne Ausgangsstoffe der Mischung ausgetauscht und die Frischbetoneigenschaften nach dem Mischen untersucht. Anhand der Ergebnisse konnte keine Beeinträchtigung auf Basis variierender Ausgangstofflieferungen festgestellt werden. Lediglich das Fließmittel, das zur Verflüssigung des Betons eingesetzt wird, wies einen untypischen Geruch auf, was vom Hersteller bestätigt und ausgetauscht wurde. Die Ergebnisse der Untersuchungen blieben jedoch hiervon unbeeinträchtigt.

Zur Überprüfung der Frischbetonkonsistenz wurde ein Prüfverfahren getestet, bei dem der hergestellte Frischbeton nach dem Anmischen auf seine Eignung zum Einbau in die Schalung geprüft wird. Der Versuchsaufbau berücksichtigt die Fließgrenze bzw. die Fließwilligkeit des Frischbetons. Für den Versuch wird der Frischbeton zunächst im Mischer angemischt und anschließend das Setzfließmaß auf einem mit einer Silikonfolie bespanntem Brett bestimmt. Die verwendete Silikonfolie entspricht der Folie, welche zum Tiefziehen verwendet wird und simuliert einen realen Untergrund und dessen Einwirkungen auf den Beton. Nach Beendigung des Versuchs wird die Versuchsplatte in einem Winkel von 45° aufgerichtet und die Position arretiert. Aufgrund der Schrägstellung und des Eigengewichts des Frischbetons beginnt dieser zu fließen. Die Messung wird beendet, sobald der Frischbeton stoppt zu fließen. Anschließend wird die Länge der sich ergebenden Frischbetonzunge gemessen und mit der Vergleichsmischung verglichen. Die unterschiedlichen Frischbetone wurden in ein Tiefziehwerkzeug eingebaut und eine Tiefziehhälfte hergestellt. Hierbei wurde das Tiefzieh- sowie Frischbetonverhalten während und nach dem Tiefziehen bewertet. Abbildung 127 zeigt den Versuchsaufbau.



Abbildung 127: Versuchsaufbau: Versuchsbrett liegend zur Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und aufgestellt unter 45° zur Bestimmung der Fließeigenschaften (rechts)

Abbildung 128 bis Abbildung 131 zeigen beispielhaft eine Mischung bei der Versuchsdurchführung sowie weitere Mischungen.

Neben den Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften wurden Elemente tiefgezogen und das Frischbetonverhalten während der Verarbeitung untersucht. Abbildung 132 bis Abbildung 134 stellen die Tiefziehversuche beispielhaft dar. Bei der Referenzmischung bilden sich während des Tiefziehens geschmeidige Ausrundungen ohne die Bildung von Rissen und Materialabläufen aus.

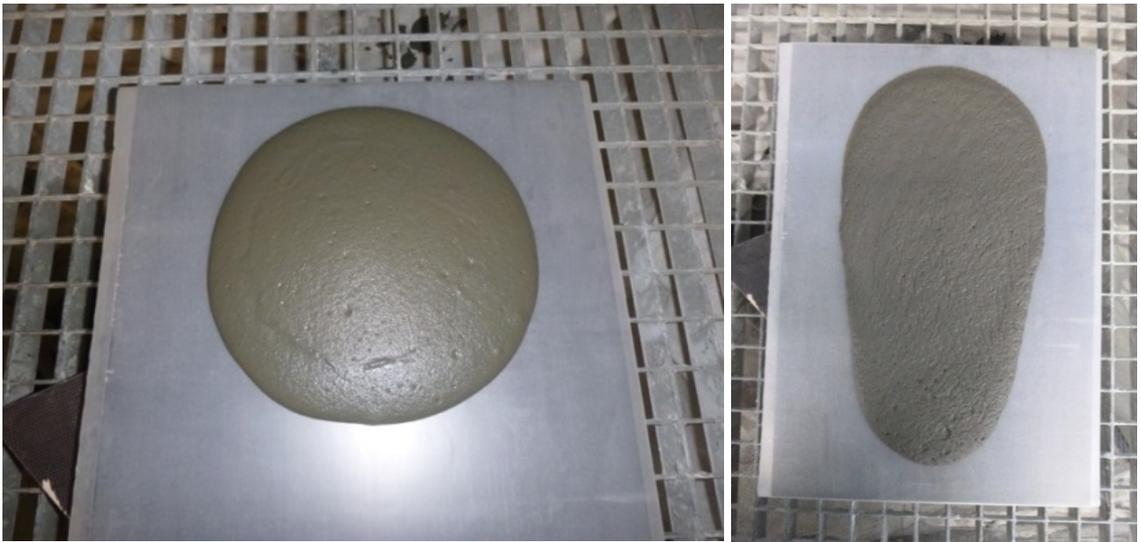


Abbildung 128: Referenzmischung nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)

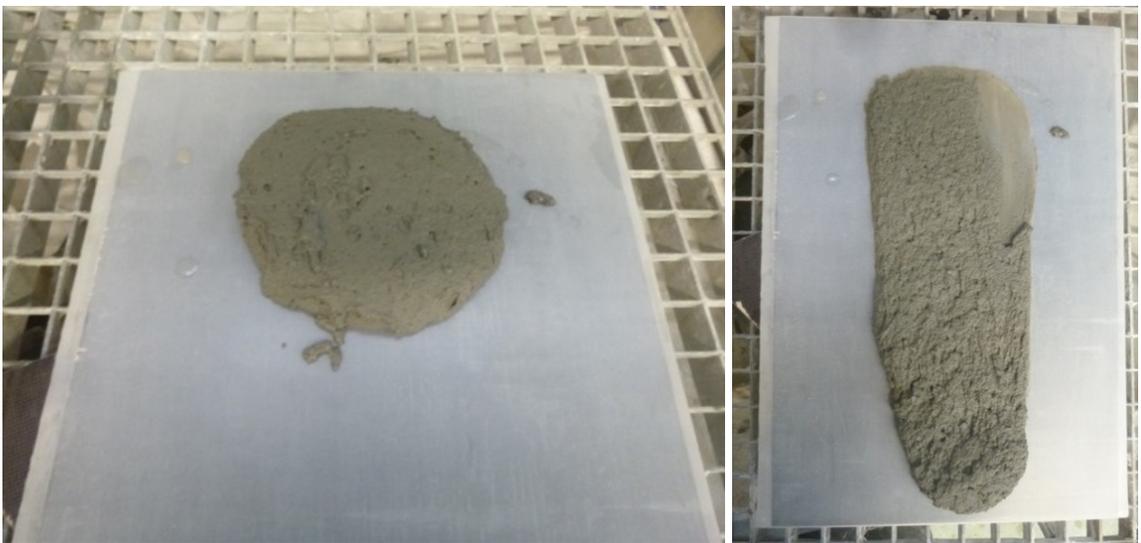


Abbildung 129: Testmischung 1 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)

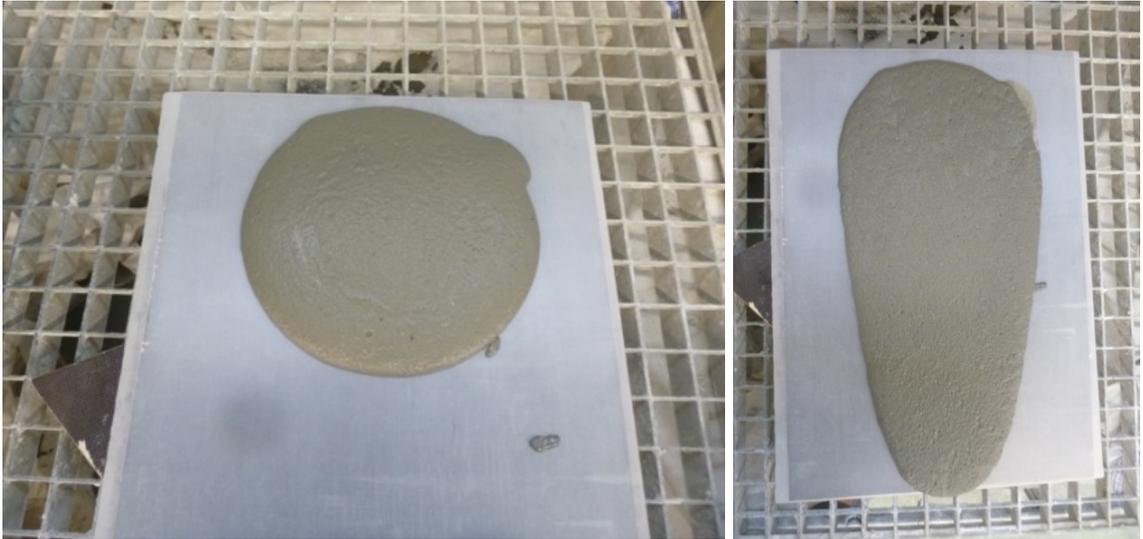


Abbildung 130: Testmischung 4 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)

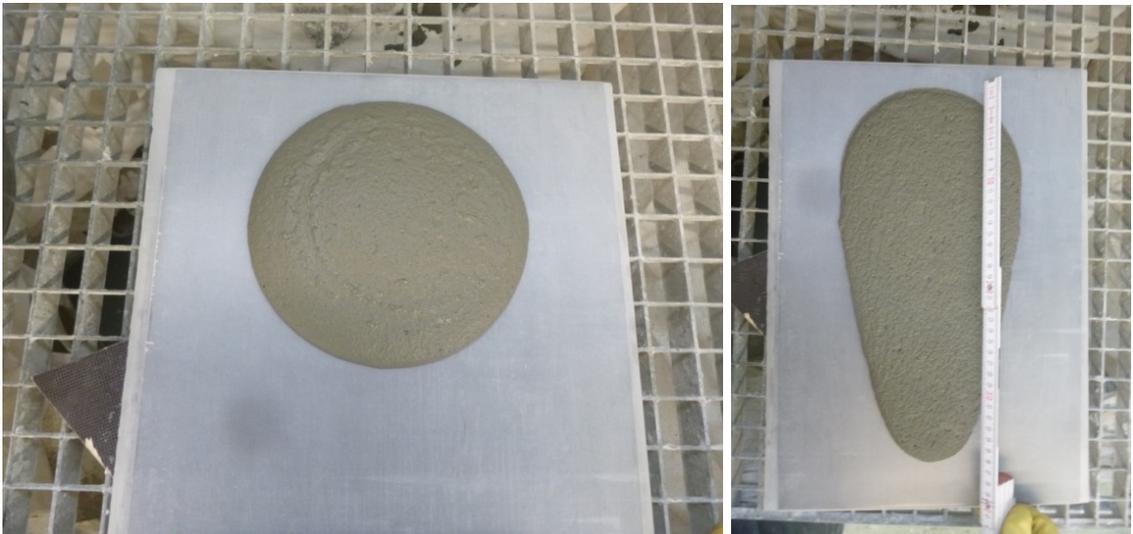


Abbildung 131: Finale Testmischung 10 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)

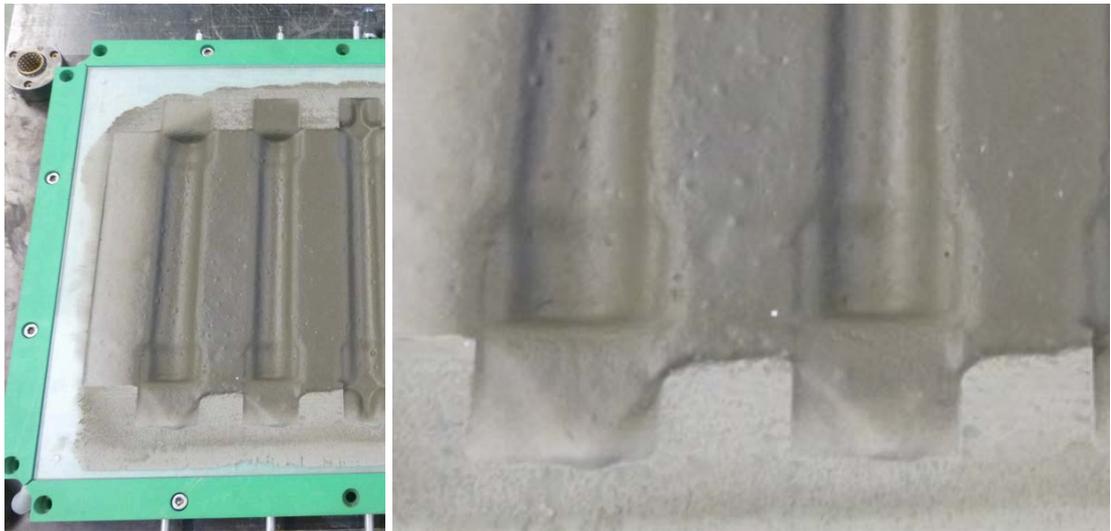


Abbildung 132: Referenzmischung tiefgezogen (rechts: Detail)

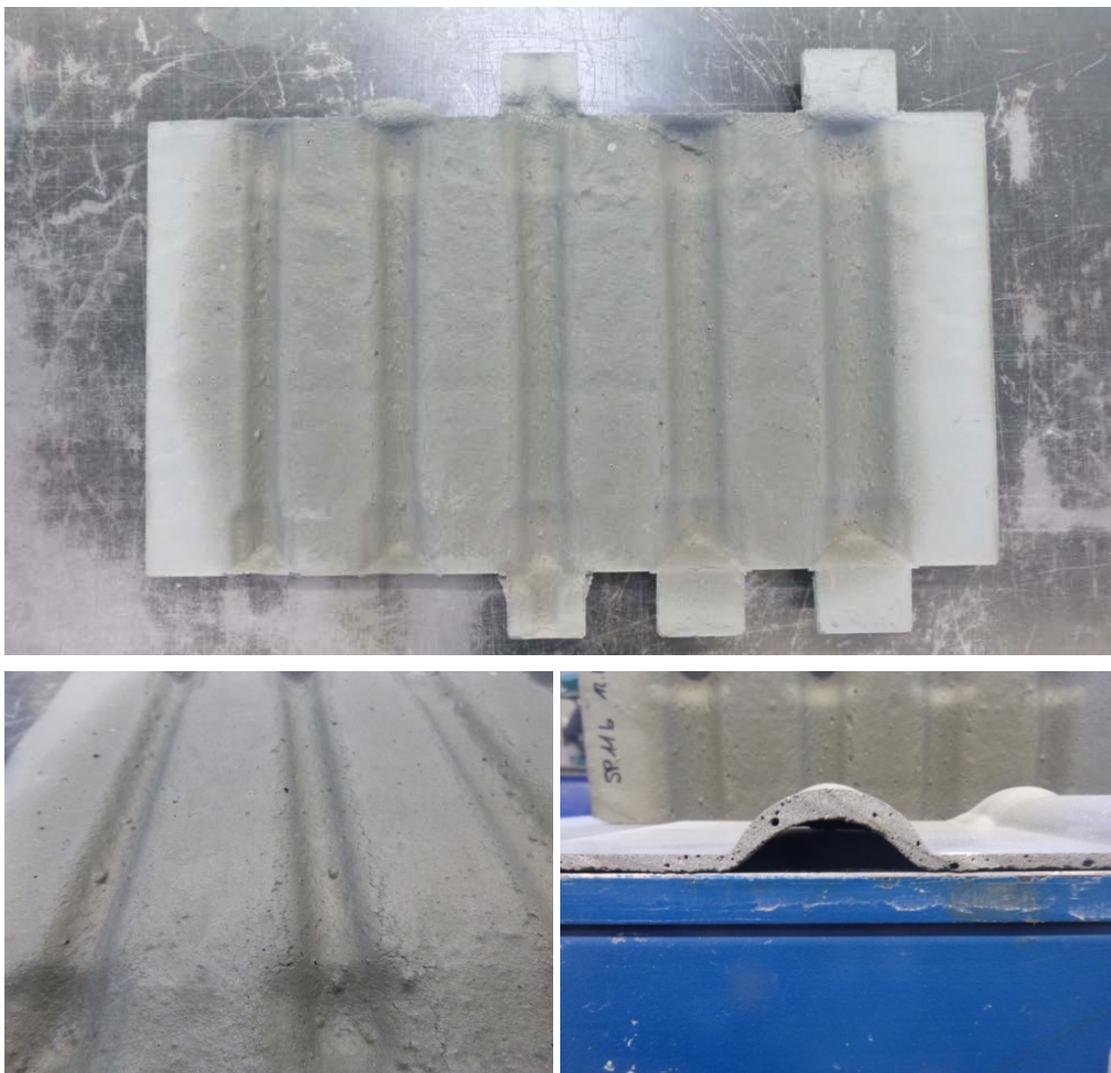


Abbildung 133: Mischung 1: Ausbildung von Rissen im Bereich der Radien (oben und unten links), Querschnitt mit inhomogener Materialverteilung des Betons (unten rechts)

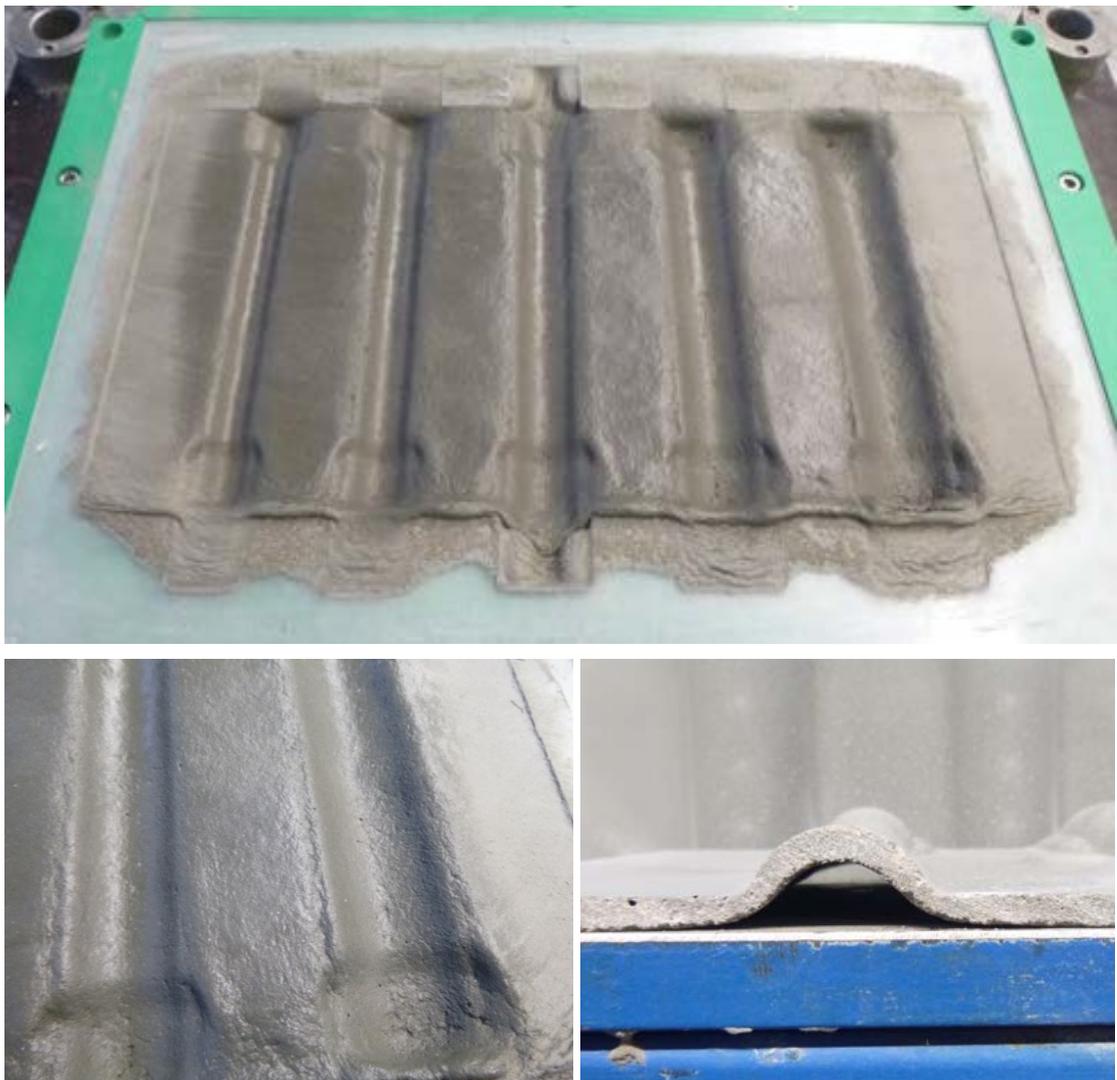


Abbildung 134: Mischung 8 mit verringerter Fließgrenze und abfließendem Frischbeton (oben und unten links), Querschnitt mit inhomogener Materialverteilung (unten rechts)

Im Rahmen der Versuche konnte mit der Testmischung 10 eine zufriedenstellende Einstellung der Frischbetoneigenschaften gefunden werden. Die Mischungseinstellung wurde an Spürgin übertragen, und es wurden gemeinsam Versuche durchgeführt, um gegebenenfalls Einstellungen der Mischung vor Ort vornehmen zu können. Die Versuche bei Spürgin wurden vergleichend zu den dargestellten Versuchen durchgeführt und ausgewertet.

Im Anschluss an die Einstellung der benötigten Frischbetoneigenschaften wurde ein TABSOLAR®-Element hergestellt. Dazu wurden die Werkzeughälften mit Frischbeton gefüllt und die tiefgezogene Werkzeughälfte in die Gegenseite eingewendet. In Abbildung 135 ist die tiefgezogene Werkzeughälfte mit Frischbeton vor und nach dem Wenden dargestellt. Wie zu erkennen konnte durch die Anpassung der Frischbetoneigenschaften ein Abtropfen und Verlaufen des Frischbetons vermieden werden.



Abbildung 135: Gefüllte Werkzeughälfte nach dem Tiefziehen des Frischbetons (links), Werkzeughälfte nach dem Wenden – kein Abtropfen des Frischbetons erkennbar (rechts)

Vergleichend zeigt Abbildung 136 eine vorbereitete Werkzeughälfte, bei der bereits ein Abtropfen des Frischbetons erkennbar ist. Infolge der hierbei eingestellten Fließgrenze konnte der Frischbeton nicht in der lokalen Position gehalten werden. Daraus ergeben sich eine Änderung der Querschnittskontur des Bauteils sowie lokale Anreicherungen von Frischbeton. Diese kann dazu führen, dass nach dem Fügen der Schalungshälften keine durchströmbaren Kanalstrukturen entstehen.



Abbildung 136: Einfluss der Fließgrenze: kein Abtropfen des Frischbetons nach dem Wenden (links), abtropfender Frischbeton infolge reduzierter Fließgrenze (rechts)

Die Einstellung der Frischbetonrheologie ist ein wichtiger Faktor für die Herstellung durchströmbarer Kanalstrukturen. In durchgeführten Versuchen, TABSOLAR®-Elemente herzustellen, wurden wiederholt verschlossene und nicht durchströmbare Kanalstrukturen beobachtet. Neben der Einstellung der Frischbetoneigenschaften wird der händische Füllprozess als weitere Fehlerquelle betrachtet, da die korrekten Füllmengen erfahrungsgemäß nicht wiederholbar händisch in die Schalung eingebracht werden können. Abbildung 137 zeigt einige typische Fehlerbilder bei der Herstellung von TABSOLAR®-Elementen, die sich abhängig von der Rezeptur, den Prozessparametern und dem Fertigungsablauf ergaben.



Abbildung 137: Typische Fehlerbilder bei der Herstellung von TABSOLAR®-Elementen: nicht ausgeprägte Kanäle (links oben), schlechte Verbindung der Hälften (rechts oben), offene Kanäle (links unten), schlechtes Flussverhalten (rechts unten)

Nachdem die Frischbetonkonsistenz korrekt eingestellt wurde, wurde eine Verbesserung der Herstellbarkeit durchströmbarer Kanäle erwartet. Auswertungen aufgesägter TABSOLAR®-Elemente zeigten hingegen verschlossene Kanalstrukturen und/oder nicht verbundene Bauteilhälften. Diese Eigenschaften konnten trotz geeigneter Frischbetoneigenschaften beobachtet werden.

In einem weiteren Versuchsdurchlauf wurden vergleichbare Mengen an Frischbeton in die Schalung eingebracht, jedoch die Einpresstiefe der Schalungshälften ineinander verringert. Durch dieses Verfahren wurde eine geringfügige Verdrängung des Frischbetons erwartet, um somit einen durchströmbareren Kanalquerschnitt sicherzustellen. Nach dem Aushärten des Bauteils wurde dieses aufgesägt und der Plattenquerschnitt bewertet. Infolge der lediglich geringfügig reduzierten Einpresstiefe der Werkzeughälften wurde kein bzw. lediglich ein partieller Verbund der Schichten beobachtet. In Abbildung 138 sind beispielhaft Plattenquerschnitte der hergestellten und untersuchten TABSOLAR®-Elemente dargestellt.

Aus diesen und den bereits in der Vergangenheit durchgeführten Versuchen wird die Schlussfolgerung gezogen, dass die Herstellung von durchströmbareren TABSOLAR®-

Elementen maschinell erfolgen muss. Händisch und im Labormaßstab hergestellte Versuchselemente sind nur in vereinzelt Fällen realisierbar und zielsicher. Das Risiko, dass ein nicht maschinell hergestelltes Element einen Defekt aufweist oder nicht sollkonform ist, ist als hoch zu bewerten. Daher ist eine maschinelle Produktion zu empfehlen und wird als dringend notwendig und Erfolg versprechend erachtet.



Abbildung 138: TABSOLAR®-Element mit nicht durchströmbaren Kanalstrukturen, trotz geeigneter Frischbetonkonsistenz

2.4.5 Herstellung durch Membran-Vakuumtiefziehverfahren

Bei einem Projekttreffen am 27./28.9.2017 in Anwesenheit der Teilnehmenden war erfolgreich ein großes TABSOLAR®-Element hergestellt worden (Abbildung 139 bis Abbildung 144).



Abbildung 139: Werkzeughälften vorbereitet zum Betonieren



Abbildung 140: Betonierte Hälften nach dem Tiefziehen vor dem Einwenden und Zusammenfügen



Abbildung 141: Ausgeschaltetes TABSOLAR®-Element: Kanalseite



Abbildung 142: Ausgeschaltetes TABSOLAR®-Element: Ebene Außenseite



Abbildung 143: Aufgetrenntes TABSOLAR®-Element



Abbildung 144: Aufgetrenntes TABSOLAR®-Element: Detailansicht der Kanäle

Im Rahmen von nachfolgend durchgeführten Herstellversuchen konnten jedoch wiederkehrende Probleme beobachtet werden, durch welche die Ausbildung der Kanalstrukturen bzw. des Lagenverbunds nachteilig beeinflusst werden (siehe 2.4.4).

Im Projektverlauf wurde erkannt, dass die Einfüllmenge an Frischbeton in die Schalung nur bedingt händisch erfolgen kann, da dieses zu hohen Einflüssen und Schwankungen unterliegt. Daher wird die Herstellung von Elementen auf einer Kleinstproduktionsanlage empfohlen, über die Schalungen gezielt und exakt über eine maschinelle Dosierung befüllt werden können. Die Reproduzierbarkeit von durchströmbareren TABSOLAR®-Elementen wird durch die maschinelle Herstellung positiv und erfolgversprechend angesehen.

Durchströmbare Kanalstrukturen

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben können derzeit keine zuverlässig durchströmbaren Kanalstrukturen hergestellt werden. Gemeinsam mit Spürgin hat G.tecz daher Versuche durchgeführt, welche zum Ziel hatten, das Verfahren derart anzupassen, dass durchströmbare Kanalstrukturen hergestellt werden können. Bei dem bisherigen Verfahren können die beim Tiefziehen entstandenen Kanalstrukturen durch unterschiedliche Ursachen verschlossen werden, oder es findet kein Verbund zwischen den Einzellagen statt, welches zum Ausschluss des Bauteils führt.

Mit dem weiterentwickelten Verfahren werden die Kanalstrukturen beim Einwenden der Schalungshälften durch ein geeignetes, reversibles Stützmaterial geschützt. Ein Lagenverbund kann gewährleistet werden, da die Werkzeughälften bei dem angewendeten Verfahren geringfügig überfüllt werden können.

Nach einigen Versuchen konnten durchströmbare Kanalstrukturen hergestellt werden. Zur Erprobung wurden diese Versuche an kleinen Musterelementen durchgeführt und später auch an größeren TABSOLAR®-Elementen erprobt.

Abbildung 145 zeigt durchströmbare kleine Musterelementen, welche mit erwärmtem Wasser durchströmt wurden. Die Temperaturlausbreitung wurde mittels Thermografie dokumentiert.

Vorversuche an zunächst hergestellten kleinen Musterelementen weisen eine einfache Kanalstruktur auf, um das Verfahren zu überprüfen, ungeachtet von der Durchströmung und Druckverlusten im Kanal selbst. Versuchsweise wurde die Kanalstruktur auch variiert, wie in den Thermografieaufnahmen in Abbildung 146 zu sehen ist.



Abbildung 145: Beispiel eines kleinen Musterelementen (links) mit durchströmbarem Kanalquerschnitt (rechts)

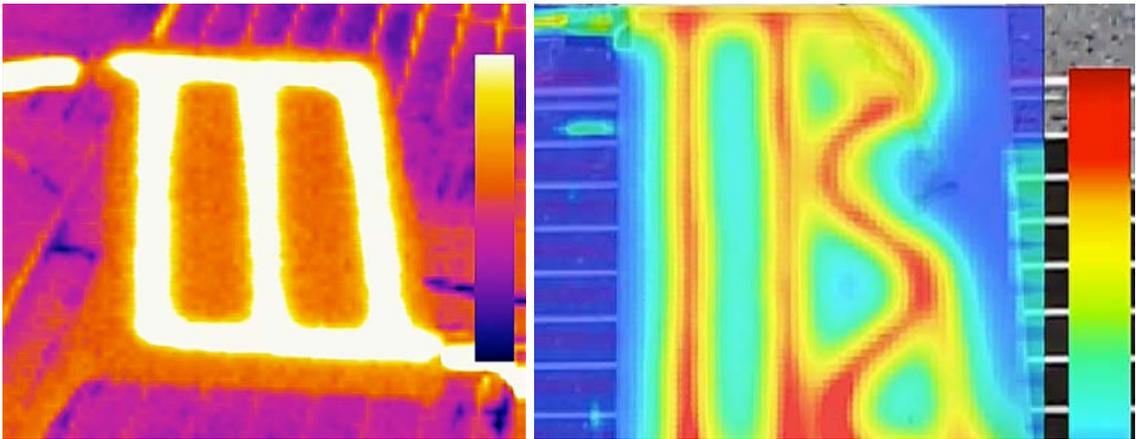


Abbildung 146: Thermografieaufnahme von durchströmten kleinen Musterelementen mit geradliniger (links) bzw. freier (rechts) H-Anordnung der Kanalstrukturen

In einem weiteren Versuch wurde das Verfahren auf die im Projekt verwendete Werkzeugschalung erfolgreich angewendet. Hierzu wurde ein TABSOLAR®-Element bei Spürgin hergestellt und nach dem Aushärten mit aufgeheiztem Wasser durchströmt. Dieser Versuch wurde mittels Thermografiekamera dokumentiert, wie Abbildung 147 und Abbildung 148 zeigen. Die feuchten Stellen sind keine Undichtigkeiten im Element, sondern durch den offenen Ablauf entstanden, wie in der oberen rechten Bildecke der Abbildung 147 zu erkennen ist.



Abbildung 147: Durchströmbares TABSOLAR®-Element – hergestellt bei Spürgin unter Zuhilfenahme des angepassten Verfahrens; der offene Ablauf ist rechts oben zu erkennen

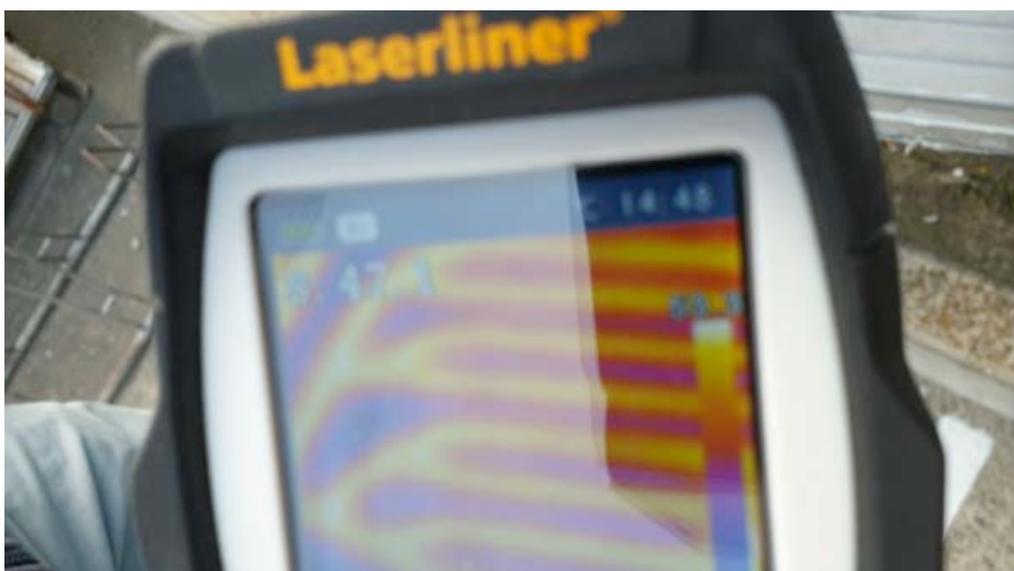


Abbildung 148: Thermografie des durchströmten TABSOLAR®-Elements

Parallel zu dem Ansatz von G.tecz und Spürgin wurde am Fraunhofer ISE eine weitere, davon unabhängige, Modifikation des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens im Labormaßstab vorgenommen. An einem neuen Versuchswerkzeug wurden ebenfalls kleine Musterelemente hergestellt. Für die Versuche hatte G.tecz eine Betonmischung (Pre-mix) zur Verfügung gestellt, die allerdings nicht dem UHPC entspricht, der zur Herstellung der großen TABSOLAR®-Elemente entwickelt wurde, sondern lediglich Versuche unter Verwendung einfacher Mischer ermöglicht. Abbildung 149 zeigt ein Musterelement mit mehreren Querschnitten. Die Luftblasen sind auf die nicht optimale Betonmischung zurückzuführen.



Abbildung 149: Mit Hilfe eines zweiten modifizierten Membran-Vakuumtiefziehverfahrens hergestelltes kleines Musterelement (oben) mit Querschnitten (Mitte und unten)

Trotz der nicht idealen Materialbedingungen zeigen alle Querschnitte offene Kanäle sowie eine gute Verbindung der beiden Hälften. In weiteren Schritten ist zu prüfen, inwiefern

das Verfahren reproduzierbar und insbesondere auf große TABSOLAR®-Elemente übertragbar ist.

Mit Hilfe des ersten modifizierten Verfahrens kann dargestellt werden, dass damit durchströmbare TABSOLAR®-Elemente herzustellen sind, mit Hilfe des zweiten gegebenenfalls ebenso, sofern es sich bei großen TABSOLAR®-Elementen mit UHPC ebenfalls als erfolgreich erweist. Für das Folgeprojekt TABSOLAR III ist geplant, das Membran-Vakuumtiefziehverfahren zu überarbeiten, so dass produktionssicher durchströmbare Bauteile auf einer teilautomatisierten Produktionsanlage hergestellt und gleichzeitig Rüstzeiten der Produktionsmaschine reduziert werden können. Durch die Automation des Prozesses sowie die maschinelle Nutzung für einzelne Prozesse, wie z. B. Einwiegen der Zuschlagsstoffe, Mischen in einem Vakuummischer, Pumpen, Füllen der Schalungen, Einwenden der Werkzeughälften, Überwachung der Frischbetoneigenschaften, Temperaturregelung, Nachbehandlung usw., wird eine erhebliche Steigerung und Sicherung der Produktqualität und Funktion erwartet.

2.4.6 Fassadenkonzepte

Im Abgleich mit der Markt- und Bedarfsanalyse wurden bereits Konzepte zur konstruktiven und technischen Integration des TABSOLAR®-Elements in die Fassade entwickelt. Hierbei wurden die vorab als zielführend festgestellten Fassadensysteme betrachtet: WDVS, VHF und Sandwichwand (Abbildung 150 bis Abbildung 152).

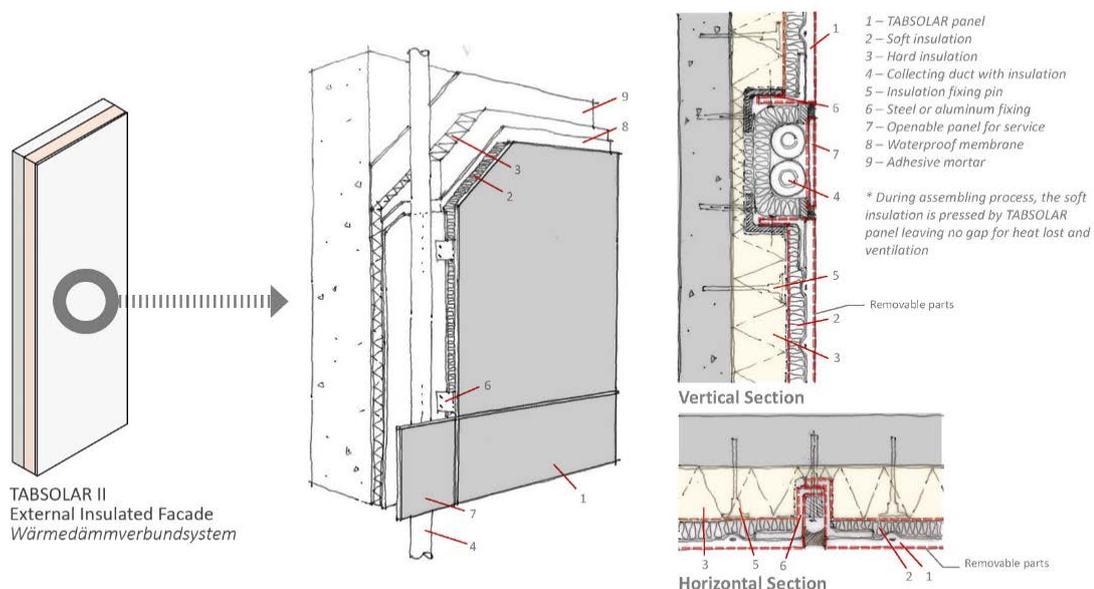


Abbildung 150: Konzept Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

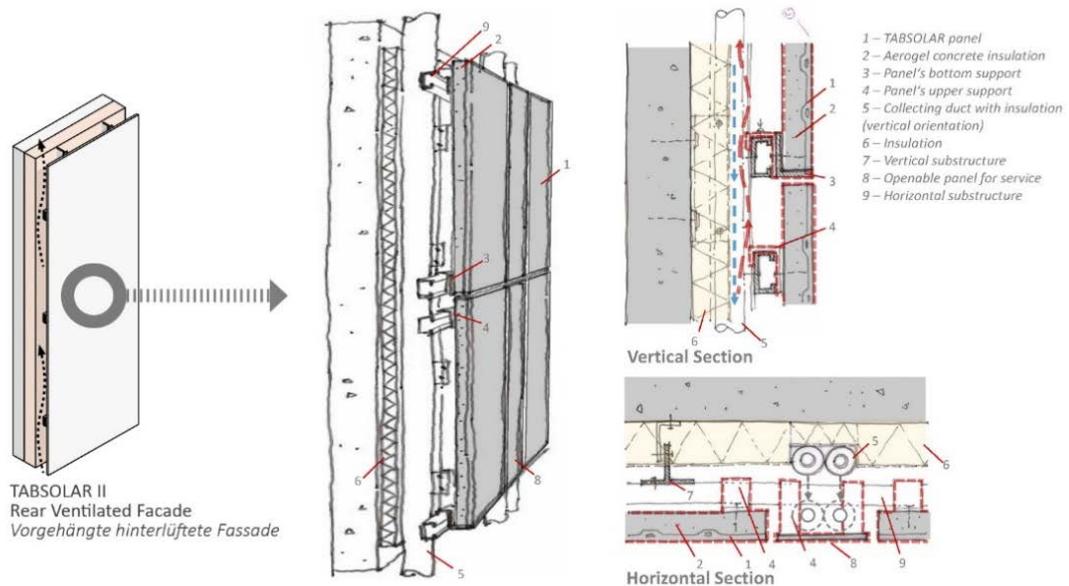


Abbildung 151: Konzept vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

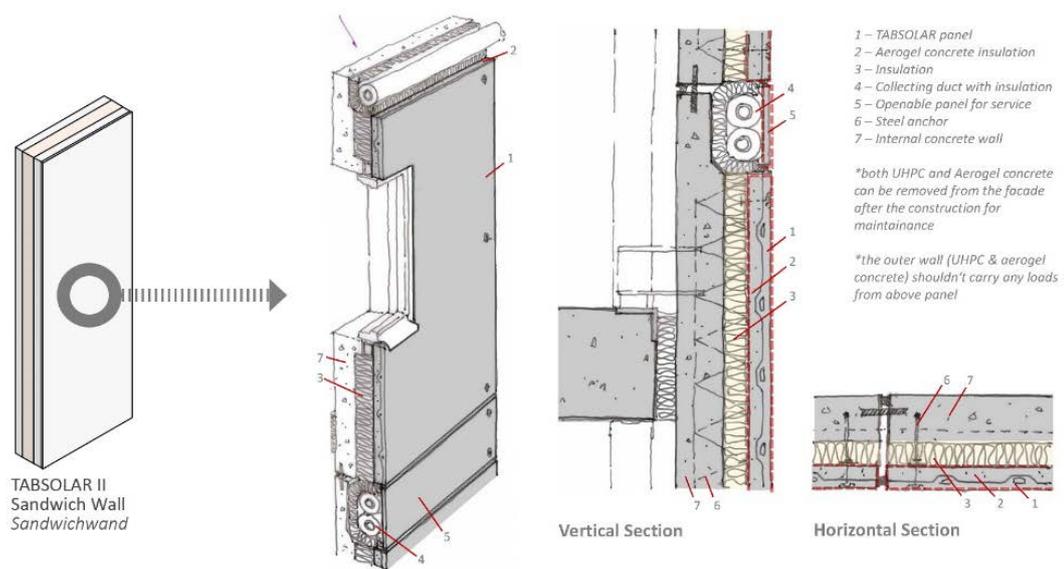


Abbildung 152: Konzept Sandwichwand

Die Fassadenkonzepte wurden auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften, speziell den Temperaturverlauf im Wandaufbau hin, simuliert (Abbildung 153). Dies dient vor allem dazu, das Ausfallen von Tauwasser innerhalb des Systems zu betrachten und für die weitere Entwicklung zu berücksichtigen bzw. entsprechend konstruktiv oder materialtechnisch darauf zu reagieren.

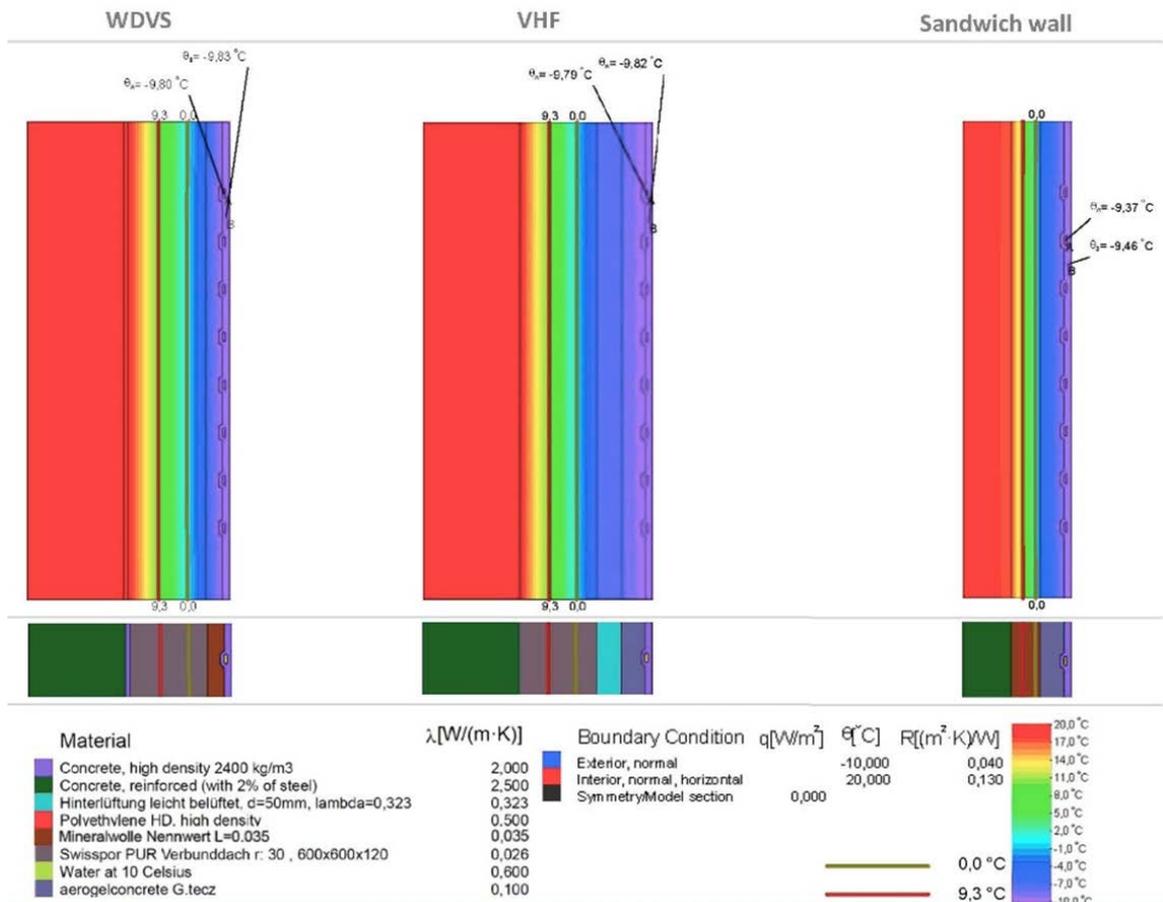


Abbildung 153: Thermische Berechnung Fassadenkonzepte

Im Zuge der Erarbeitung von Lösungen zur Fassadenintegration von TABSOLAR®-Elementen wurden von Priedemann Facade-Lab mit aktuellem Fokus auf das Fassadensystem der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten unter Betrachtung der TABSOLAR®-Produktfamilien entwickelt. Dies hat den Vorteil, TABSOLAR®-Elemente gut mit gängigen Fassadensystemen kombinieren und alle Produktfamilien modular verarbeiten zu können. Die Schwierigkeit dabei liegt allerdings in der systembedingten Hinterlüftung der Bekleidungsebene, in diesem Fall des TABSOLAR®-Elements. Dies ist je nach Produktfamilie bzw. Betriebsszenario aber aufgrund der dadurch entstehenden Wärmeverluste zu vermeiden. Hierzu gibt es unterschiedliche Ansätze der rückseitigen Dämmung der TABSOLAR®-Elemente, wobei eine Verwendung von Mineralwolle aufgrund von geringerem Gewicht, einfacher Verarbeitung und hoher Brandschutzklasse am geeignetsten erscheint (Abbildung 154).

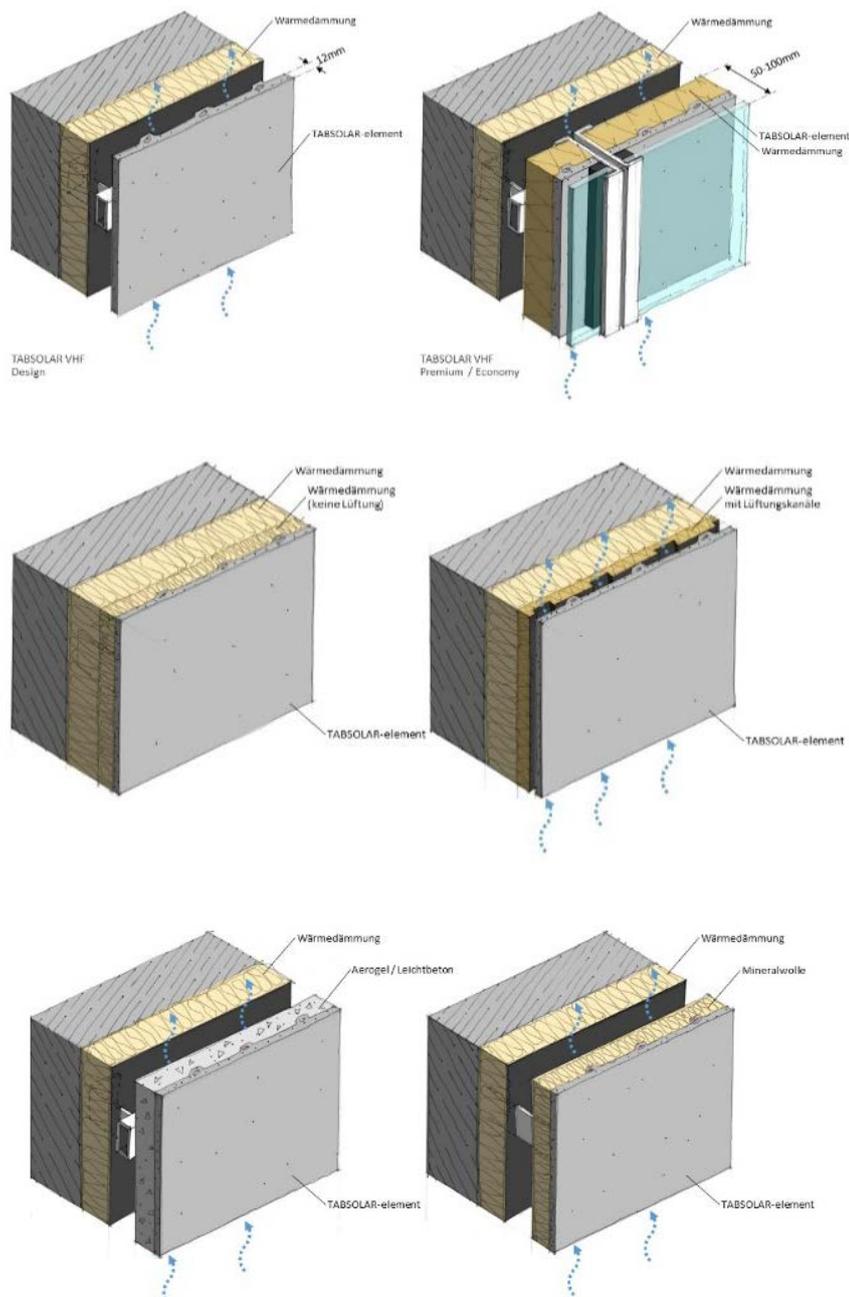


Abbildung 154: VHF mit TABSOLAR®; von oben nach unten, links/rechts: hinterlüftet/mit Wärmedämmung als *Premium*, ohne Hinterlüftung mit Wärmedämmung/mit teilweise eingefräster Wärmedämmung zur Hinterlüftung, mit Aerogelbeton als Teil des TABSOLAR®-Elements/mit rückseitiger Wärmedämmung

Zur Befestigung der TABSOLAR®-Elemente im System einer VHF müssen unterschiedliche Befestigungslösungen ermöglicht werden. So müssen sowohl unsichtbare als auch sichtbare Lösungen möglich sein. Hierfür wurden auch ausführliche Gespräche mit externen Partner wie beispielweise den Firmen SFS Intec oder KEIL Befestigungstechnik geführt. Das Thema der Befestigungstechniken ist vor allem relevant, um notwendige Randbereiche im TABSOLAR®-Element frei von FracTherm®- bzw. Sammelkanälen bei der Dimensionierung

der Elemente zu berücksichtigen. Diese Befestigungspunkte dienen zur Positionierung von Agraffen, welche wiederum in die Traversen des Unterkonstruktions-Systems einer VHF eingehängt werden. So ist es möglich, die TABSOLAR®-Elemente sowohl vertikal als auch horizontal auszurichten (Abbildung 156).

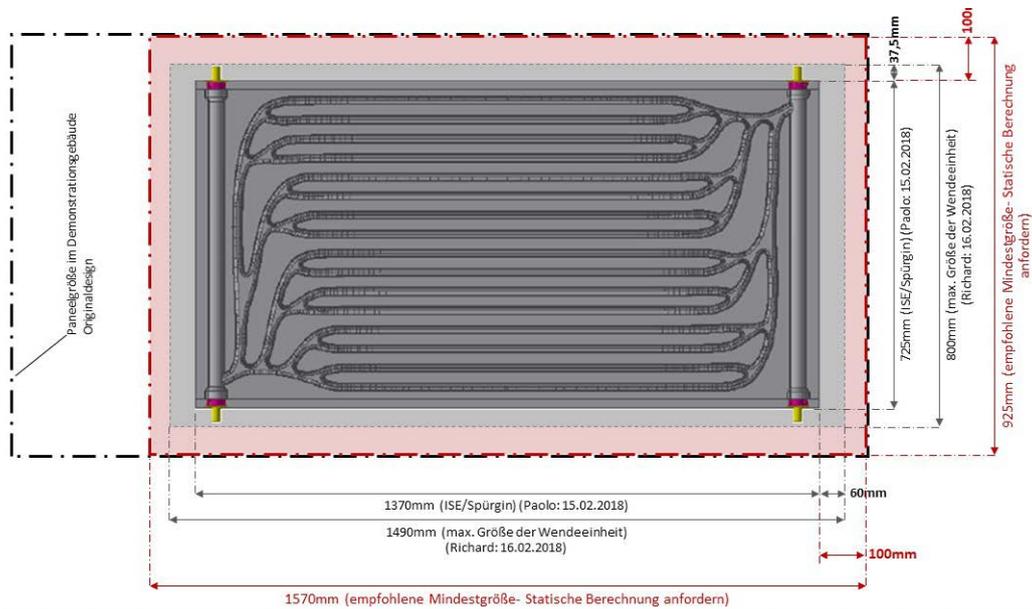


Abbildung 155: Untersuchung der Dimensionen und Randbereiche eines TABSOLAR®-Elements

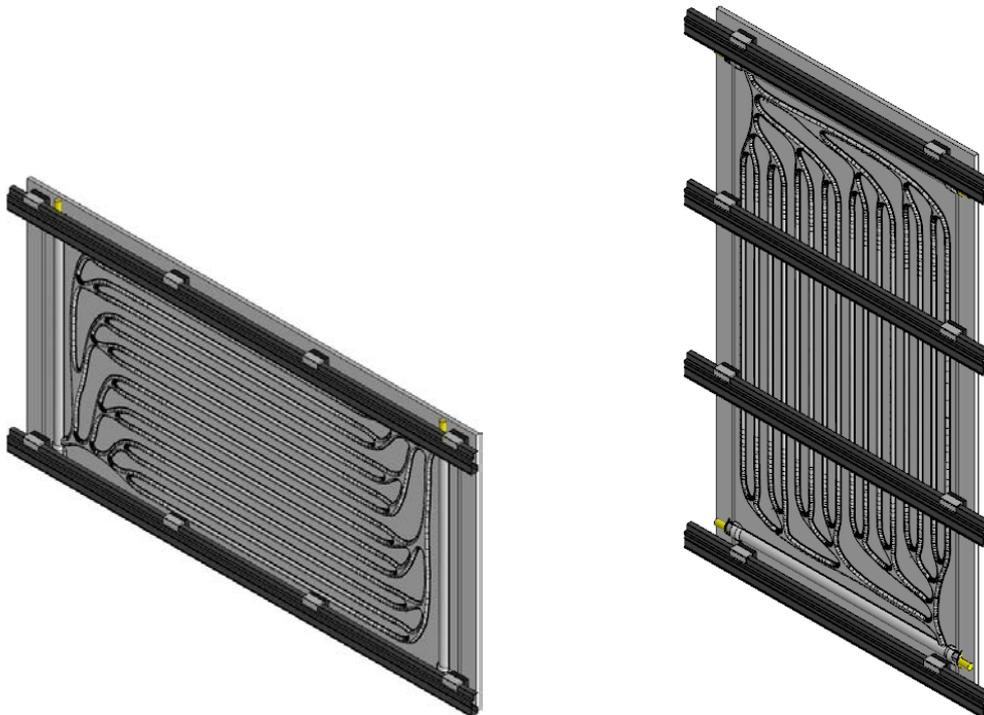


Abbildung 156: Befestigungspunkte und Traversenauslegung für vertikale und horizontale Orientierung der TABSOLAR®-Elemente

TABSOLAR®-Exponate für Messe BAU 2017

Für die Messe BAU 2017 stellte G.tecz kleine TABSOLAR®-Elemente als Handmuster mit Hilfe der Versuchsschalung aus TABSOLAR I her (ca. 340 x 460 mm). Auf der Messe sollten die drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design* präsentiert werden. Für TABSOLAR® *Premium* wurde ein Handmuster am Fraunhofer ISE spektralselektiv beschichtet, für TABSOLAR® *Economy* wurde ein weiteres schwarz lackiert. Die Oberfläche von TABSOLAR® *Design*, das eine Reliefstruktur aufwies, wurde als Sichtbetonoberfläche belassen. Versuchsweise wurde auch eine Variante von TABSOLAR® *Design* mit Reliefstruktur spektralselektiv beschichtet, die jedoch nicht auf der Messe gezeigt wurde. Dieses Muster hatte ein samtartiges Erscheinungsbild (Abbildung 158). Allerdings ist eine Nutzung ohne Witterungsschutzbeschichtung (siehe Arbeitspaket 2) oder Abdeckung nicht möglich.



Abbildung 158: Variante von TABSOLAR® *Design* mit spektralselektiver Beschichtung, jedoch ohne Witterungsschutz

Die Muster von TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Economy* wurden seitens des Fraunhofer ISE außerdem mit einer Rahmenkonstruktion und einer Polycarbonatabdeckung als »Verglasung« versehen. Die drei Produktfamilien wurden erfolgreich auf der

BAU 2017 präsentiert (Abbildung 159 und Abbildung 160). Priedemann Facade-Lab hatte dafür eine Präsentation mit Animationen erstellt, die das TABSOLAR®-Konzept sehr anschaulich darstellte (Abbildung 161).

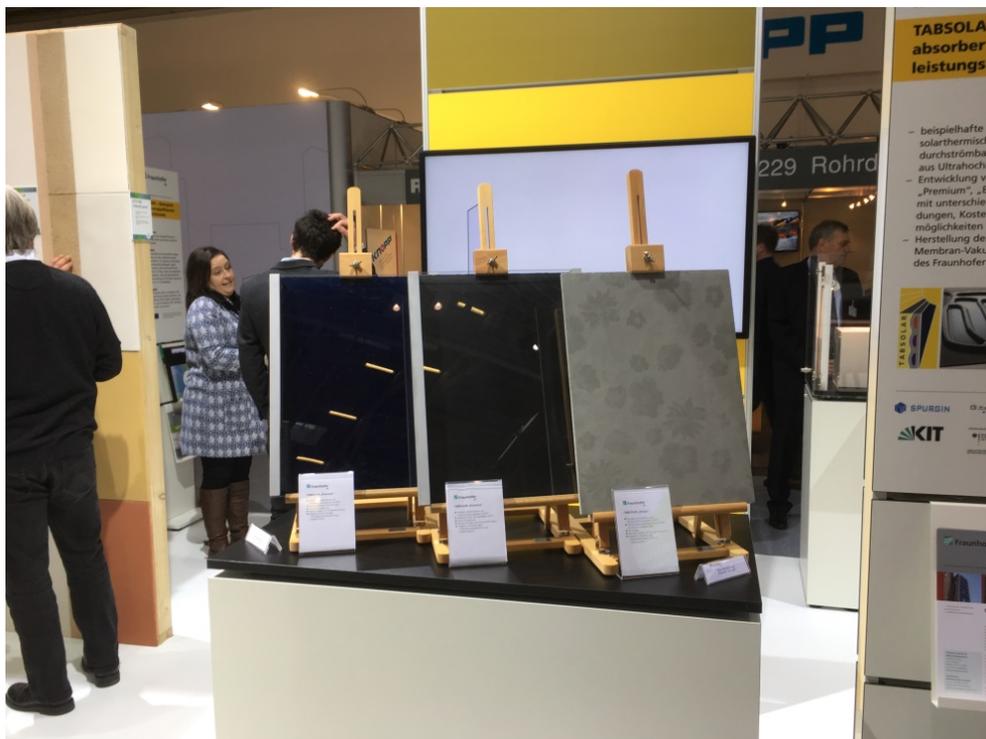


Abbildung 159: Präsentation der drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design* auf der BAU 2017 (Vorderseite)



Abbildung 160: Präsentation der drei Produktfamilien TABSOLAR® Premium, TABSOLAR® Economy und TABSOLAR® Design auf der BAU 2017 (Rückseite)

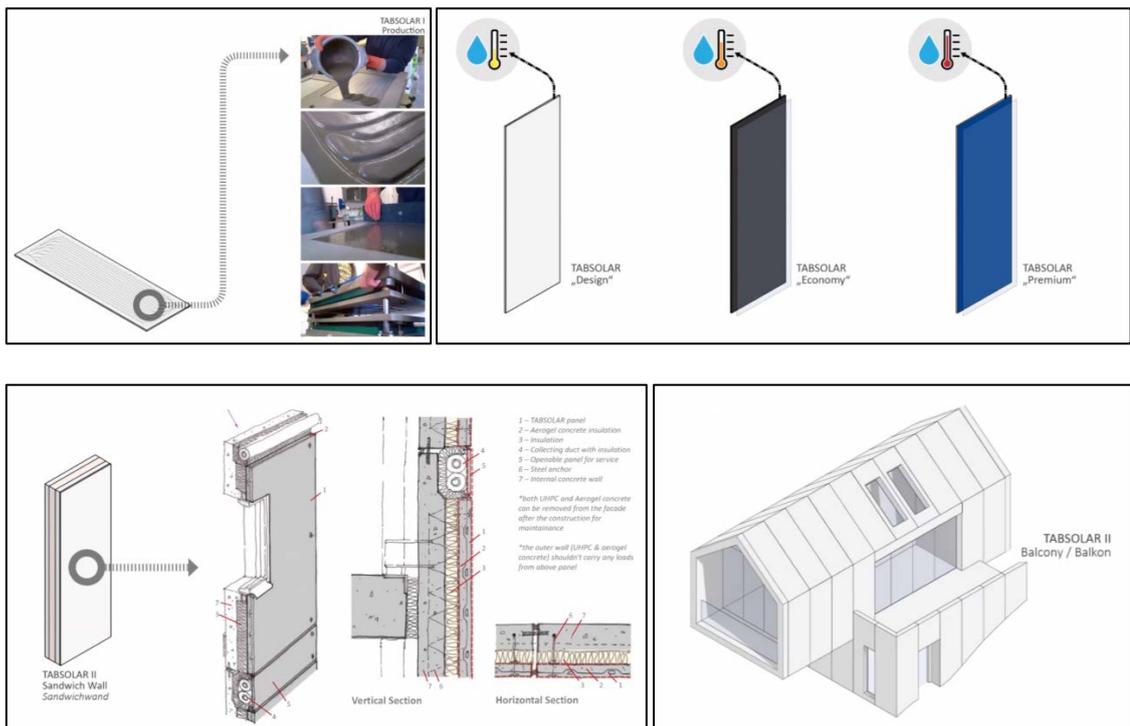


Abbildung 161: Screenshots aus der TABSOLAR®-Präsentation für die BAU 2017

TABSOLAR®-Exponate für Messe BAU 2019

Die Herstellung der beiden Exponate TABSOLAR® *Design* und TABSOLAR® *Premium* für die Messe BAU 2019 sowie deren Präsentation auf der Messe sind in Abbildung 162 bis Abbildung 164 ersichtlich. Die großen TABSOLAR®-Elemente sowie Blindelemente (ohne Kanäle) wurden bei Spürgin gefertigt und am Fraunhofer ISE spektralselektiv beschichtet (siehe Arbeitspaket 2). Die Exponate wurden vom Fraunhofer ISE und Priedemann Facade-Lab zusammengebaut. Außerdem stellte G.tecz ein Handmuster her, das die Gestaltungsmöglichkeiten demonstrierte (Abbildung 166). Die Resonanz der Messebesucher auf die ausgestellten Exponate war sehr gut.

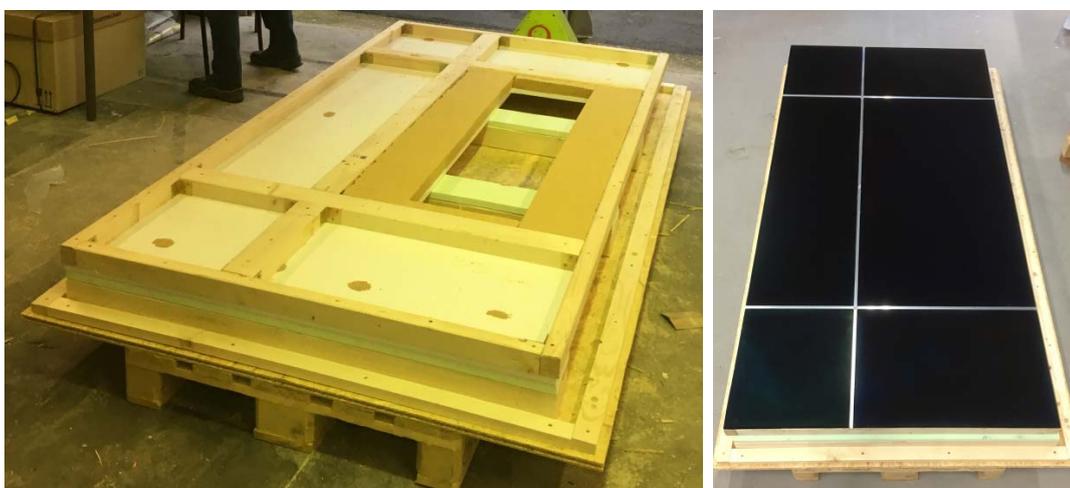


Abbildung 162: Exponat TABSOLAR® *Premium* ohne Glasscheiben ohne (links) und mit (rechts) spektralselektiv beschichteten TABSOLAR®-Elementen bzw. Blindelementen

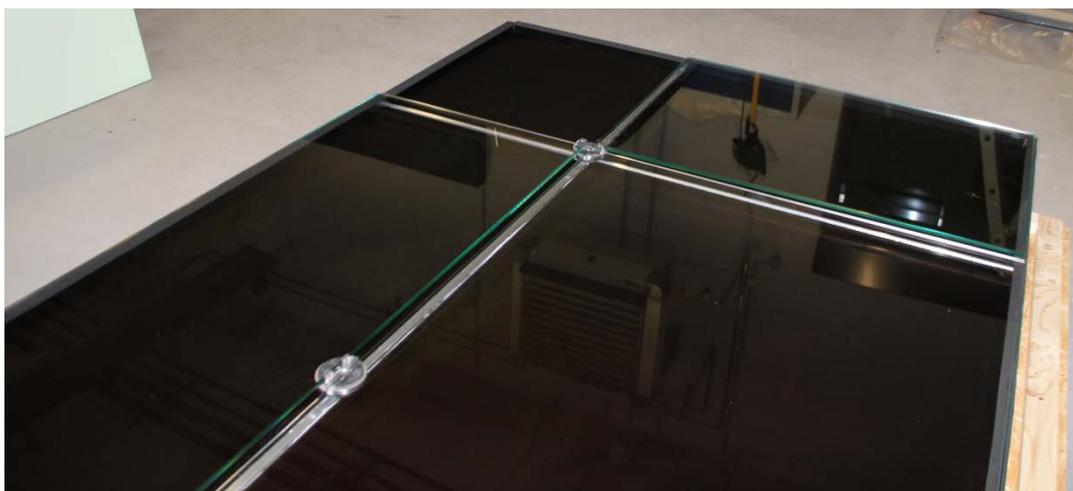


Abbildung 163: Exponat TABSOLAR® *Premium* während der Montage der Glasscheiben

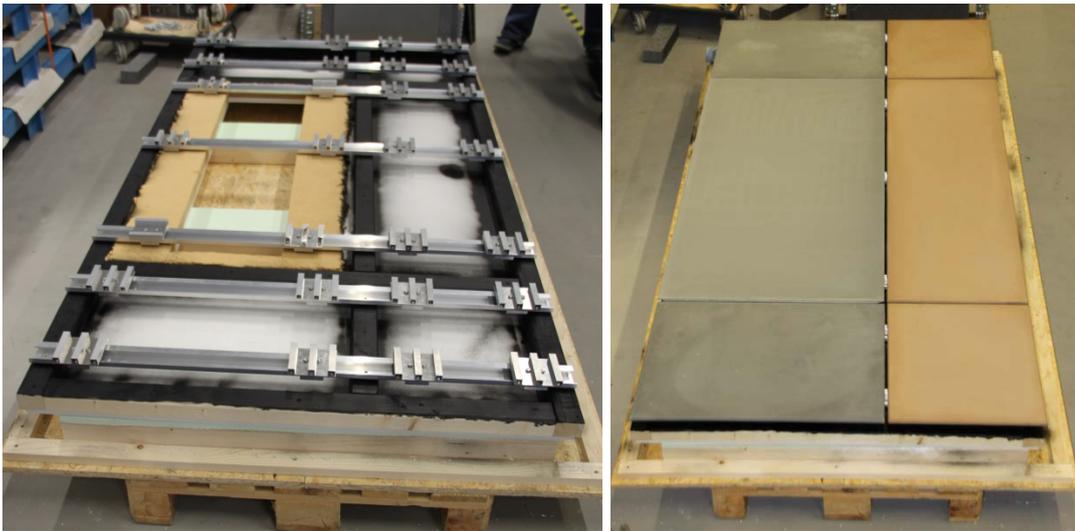


Abbildung 164: Exponat TABSOLAR® *Design* ohne (links) und mit (rechts) TABSOLAR®-Elementen bzw. Blindelementen



Abbildung 165: Vorderseite (links) bzw. Rückseite (rechts) der Exponate TABSOLAR® Premium und TABSOLAR® *Design* auf der Messe BAU 2019

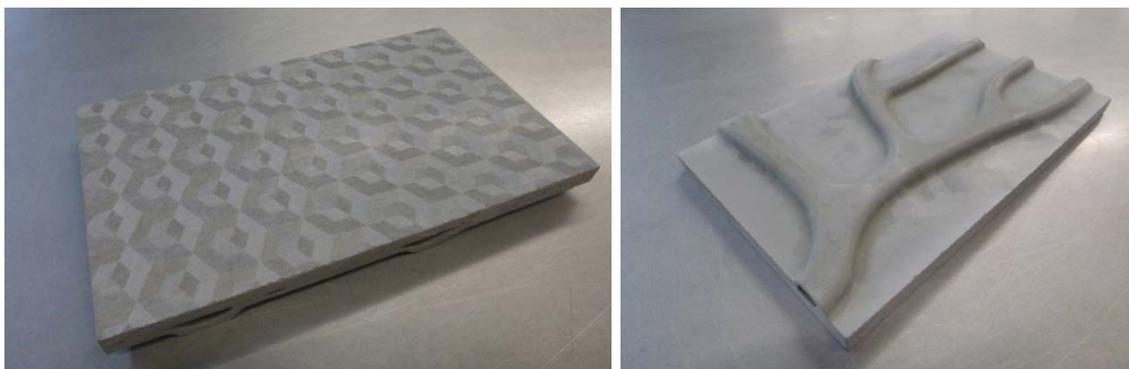


Abbildung 166: TABSOLAR®-Handmuster: Vorderseite mit 3D-Effekt-Oberfläche (links), Rückseite mit durchströmbaren FracTherm®-Kanalstrukturen (rechts)

2.5 Arbeitspaket 5: Systemsimulationen, Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Lebenszyklusbetrachtungen für drei Produktfamilien TABSOLAR® Premium, TABSOLAR® Economy und TABSOLAR® Design sowie Empfehlungen für praktische Umsetzung

2.5.1 Zusammenfassung

Für die Abschätzung der Energieströme und Temperaturen, insbesondere der Stagnationstemperaturen, von TABSOLAR®-Elementen wurden thermische Simulationen durchgeführt. Des Weiteren wurden die voraussichtlichen Bruttokollektorerträge für konstante Kollektormitteltemperaturen berechnet. Ein besonderer Fokus lag auf Simulationen für Systeme mit TABSOLAR®-Design-Elementen in Kombination mit Wärmepumpe und Eisspeicher. Am Beispiel einer Sanierung eines Mehrfamilienhauses zeigte sich, dass es voraussichtlich möglich ist, eine Außenlufteinheit durch TABSOLAR®-Design-Elemente und Eisspeicher als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu ersetzen.

Inbesondere vor dem Hintergrund des Einsatzes von Beton kommt Lebenszyklusbetrachtungen von TABSOLAR®-Elementen eine wesentliche Bedeutung zu. So wurde ein TABSOLAR®-Design-System mit Eisspeicher und Wärmepumpe mit zwei Vergleichsszenarien auf Basis von Luftwärmepumpe und Wärmedämmverbundsystem (WDVS) bzw. UHPC-Fassade ohne thermische Funktionalität hinsichtlich Primärenergie und Treibhauspotenzial verglichen. Alle Komponenten des Heizungssystems, die sich in den verschiedenen Pfaden unterscheiden, und die jeweilige Südfassade wurden mit Hilfe des Programms Umberto® und der Datenbank Ecoinvent V3.5 ökologisch inventarisiert. Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend, weil sich voraussichtlich durch eine architektonisch attraktive Fassade eine Außenlufteinheit ersetzen lässt, was ästhetisch und akustisch vorteilhaft ist, und sich außerdem die Bilanz bezüglich Primärenergie und

Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 25 Jahren nach aktuellem Stand für TABSOLAR® vorteilhaft darstellt.

Erste Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass TABSOLAR®-Elemente sowohl als architektonisch ansprechende Fassade zur Energiegewinnung als auch als Flächenheiz- bzw. -kühlelement voraussichtlich attraktive Preise erzielen können. Bezüglich der Gesamtsysteme stellen Eisspeicher nach heutigem Stand der Technik noch einen hohen Kostenfaktor dar, der sich wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Daher kommt kostengünstigen Eisspeicherkonzepten oder Konzepten, die vollständig auf Eisspeicher verzichten können, eine hohe Bedeutung zu.

Es wurden unterschiedliche Anwendungsfälle in Bezug auf Integration in die Gebäudehülle und Gebäudetypologien untersucht und bewertet, um einen Überblick über zukünftige Nutzungsszenarien zu erhalten und die TABSOLAR®-Technologie entsprechend weiterzuentwickeln.

2.5.2 Modellierung und Systemsimulationen

Im Vorläuferprojekt TABSOLAR I wurde am Fraunhofer ISE ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem Jahressimulationen der Produktfamilien TABSOLAR® *Design*, *Economy* und *Premium* gekoppelt mit einem Gebäude und der Haustechnik in der Simulationsumgebung TRNSYS durchgeführt werden können. In TABSOLAR II wurde dieses Modell nun so weiterentwickelt, dass es auch in der Simulationsumgebung Modelica genutzt werden kann. Modelica wird aufgrund seiner Wartungsfreundlichkeit in der Haustechnik zunehmend genutzt. Zusätzlich wurde die Genauigkeit der Berechnung der winkelabhängigen effektiven Absorptionsgrade erhöht und auch die Nutzerfreundlichkeit für die Berechnung verschiedener Kombinationen von Abdeckscheibe und Absorberoberfläche.

Abbildung 167 zeigt eine Zeichnung eines Wandaufbaus der Produktfamilie TABSOLAR® *Design* mit UHPC mit Kanalstruktur, zwei isolierenden Schichten und einer Betonwand innen (von außen nach innen). Dieser Aufbau wurde für die in Tabelle 10 gezeigten Fälle mit COMSOL simuliert, um anschließend die effektiven thermischen Widerstände innerhalb dieser solarthermischen Gebäudehülle zu bestimmen.

Mit dem Modelica-Modell können nun fast alle thermischen und optischen Parameter variiert werden, ohne dass neu programmiert werden muss. Zum Beispiel kann der Abstand zwischen Abdeckscheibe und Absorber gewählt werden. Abbildung 168 zeigt eine solche Variation, die für die Entwicklung zum Schluss führte, dass der Abstand mindestens 1,5 cm betragen sollte.

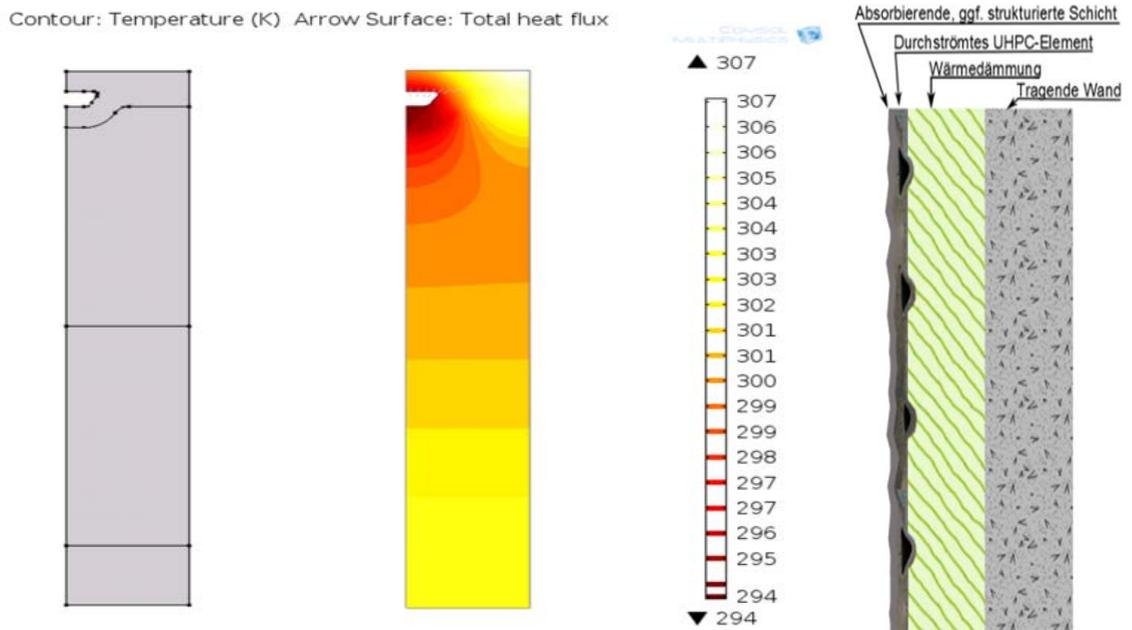


Abbildung 167: Zeichnung eines Wandaufbaus von TABSOLAR® Design mit UHPC mit Kanalstruktur, zwei isolierenden Schichten (jeweils 7,5 cm unterschiedliche Mineralwolle) und einer Betonwand (20 cm) innen (von außen nach innen)

Tabelle 10: Mit COMSOL simulierte Fälle, um die thermischen Widerstände im Knotenmodell zu berechnen

Fall- Nummer	Umgebungs- temperatur	mittlere Fluidtemperatur	Raumtemperatur	Einstrahlung
	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]
Fall 1	30	40	20	800
Fall 2	20	20	20	800
Fall 3	10	20	20	0
Fall 4	30	20	20	800
Fall 5	10	30	20	0
Fall 6	30	20	30	800

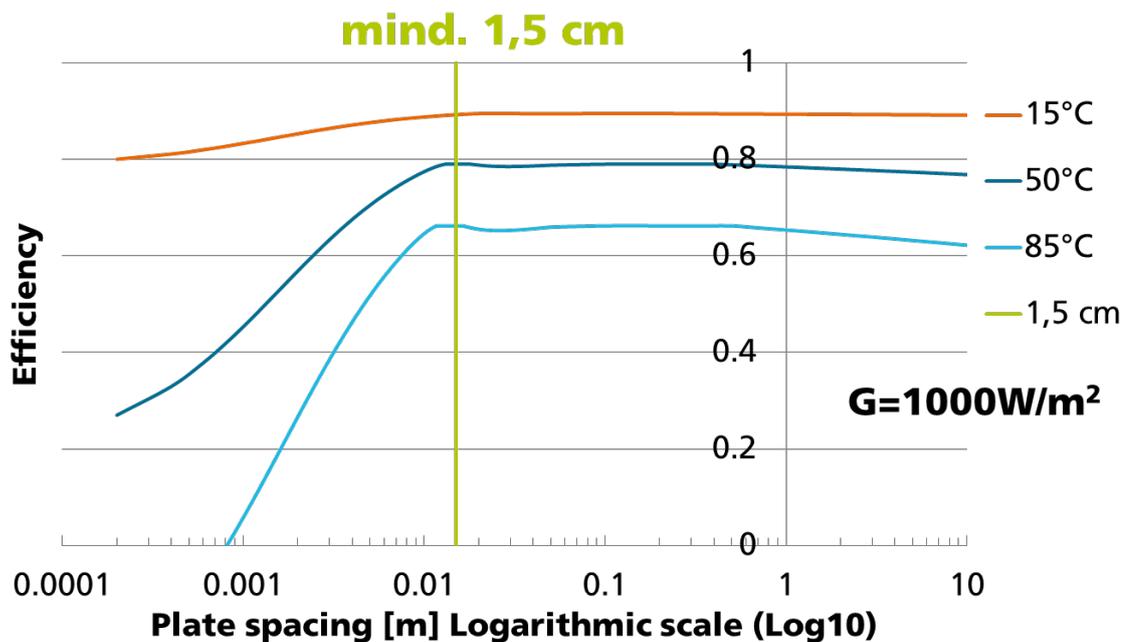


Abbildung 168: Wirkungsgrad von TABSOLAR® Premium mit unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Abdeckscheibe

Während in TABSOLAR I in erster Näherung die Wärmeverluste des Absorbers nach innen vernachlässigt wurden, konnte nun der Energiestrom in den Innenraum der verschiedenen Varianten auch im Stagnationsfall quantifiziert werden. Tabelle 11 zeigt die berechneten Energieströme und Temperaturen, die auch für die Wahl der Materialien in den Konfigurationen wichtig sind. Während die Normen typischerweise 25 W/(m²K) als äußeren Wärmeübergangskoeffizient vorsehen, wurden 12 W/(m²K) als untere Grenze z. B. an sehr windstillen Sommertagen angenommen. Da zu diesem Zeitpunkt noch kein Randverbund entwickelt war, wurde die Simulation ohne Randeffekte durchgeführt. Bei Verglasungen spricht man dabei von »centre-of-glazing«-Werten. Mit Randeffekten wie thermischen Verlusten durch die Halterung der Abdeckscheibe und an den Rändern des Kollektorfelds verringern sich die Temperaturen in der Stagnation.

Anschließend wurden Jahressimulationen sowohl der drei TABSOLAR®-Produktfamilien als auch eines kommerziellen Flachkollektors und einer Wand ohne Solarthermiefunktion als Referenz durchgeführt.

Während Tabelle 11 die Stagnationstemperaturen unter konstanten Umgebungsbedingungen (stationäre Situation mit einer Einstrahlung von 1000 W/m²) zeigt, wurde für Tabelle 12 der Stagnationsfall mit den Klimadaten einer Südfassade in Frankfurt am Main über Jahressimulationen untersucht. Es zeigt sich, dass die Maximaltemperaturen deutlich unter den jeweiligen Temperaturen aus Tabelle 11 liegen. Durch Berücksichtigung von Randeffekten werden die Maximaltemperaturen weiter sinken. Bei Windstille und dadurch

niedrigem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten h_{ext} entstehen jedoch weiter deutlich höhere Temperaturen als mit dem im Jahresmittel korrekten normativen Wert von $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Diese Ergebnisse fließen in die weitere Entwicklung der TABSOLAR®-Produktfamilien ein.

Tabelle 11: Simulation der drei Produktfamilien TABSOLAR® *Design*, *Economy* und *Premium* in einem Stagnationsfall mit konstanter Einstrahlung und mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten h_{ext} von der äußersten Schicht des Kollektors an die Umgebungsluft. T5 entspricht der Temperatur der Absorberoberfläche, T7 der Temperatur der raumseitigen Oberfläche und T_{int} der Raumtemperatur.

	Design		Economy		Premium	
	Type005		Type006		Type007	
h_{ext} [W/m² K]	25	12	25	12	25	12
T4 [°C]	25,0	25,0	52,6	82,1	57,5	92,0
T5 [°C]	49,3	75,3	155,9	180,9	204,6	236,6
T6 [°C]	49,2	75,2	155,6	180,5	204,2	236,1
T7 [°C]	25,8	39,7	29,1	29,9	30,6	31,6
T_{int} [°C]	25	25	25	25	25	25
Q_{abs} [W/m²]	612,8	612,8	722,6	722,6	854,8	854,8
Q_{int} [W/m²]	5,9	8,9	31,6	37,6	43,4	51,1
Q_{use} [W/m²]	0	0	0	0	0	0
Q_{ext} [W/m²]	606,9	603,9	691,0	685,0	811,4	803,7

Tabelle 12: Simulation der drei Produktfamilien TABSOLAR® *Design*, *Economy* und *Premium* in der Stagnation über ein Jahr mit den Klimadaten einer Südfassade in Frankfurt am Main. Gezeigt sind die maximalen Temperaturen und die dabei entstehenden Energieströme für zwei verschiedene äußere Wärmeübergangskoeffizienten h_{ext} . T5 entspricht der Temperatur der Absorberoberfläche, T7 der Temperatur der raumseitigen Oberfläche und T_{int} der Raumtemperatur.

	Design		Economy		Premium	
	Type005		Type006		Type007	
h_{ext} [W/m² K]	25	12	25	12	25	12
T4 [°C]	32,0	19,7	37,6	58,2	58,3	89,1
T5 [°C]	52,1	75,6	133,3	150,1	205,6	234,4
T6 [°C]	52,1	75,5	133,0	149,8	205,1	233,8
T7 [°C]	32,9	39,8	28,4	28,9	30,7	31,6
T_{int} [°C]	25	25	25	25	25	25
Q_{abs} [W/m²]	508,1	679,5	510,5	510,5	815,2	825,9
Q_{int} [W/m²]	4,8	8,9	26,2	30,2	43,6	50,6
Q_{use} [W/m²]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Q_{ext} [W/m²]	503,3	670,6	484,3	480,2	771,6	775,3

In beiden Fällen liegt ein einfaches Knotenmodell zugrunde (Abbildung 169). T5 repräsentiert die Temperatur der absorbierenden Fläche, T7 die Temperatur der raumseitigen Oberfläche. T4 entspricht bei den Produktfamilien TABSOLAR® *Economy* und *Premium* der Temperatur der Abdeckscheibe. Zwischen T5 und T7 gibt es die effektive Temperatur T6. R5 verbindet T5 und T6, und R6 verbindet T6 und T7. R_{fc} verbindet T6 mit der Fluidtemperatur T_{fav} . Wie bereits beschrieben wurden FEM-Simulationen durchgeführt, um die in Tabelle 13 dargestellten Werte für die thermischen Widerstände zu bestimmen. Tabelle 14 zeigt die optischen Parameter und Tabelle 15 die Parameter der stationären Stagnationsimulationen von Tabelle 11.

Für die dynamischen Simulationen gelten Frankfurter Wetterdaten, ein Massenstrom von $0,02 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, eine Raumtemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Es wurde mit 7 m^2 Kollektorfläche und einem Speicher von 390 Litern gerechnet.

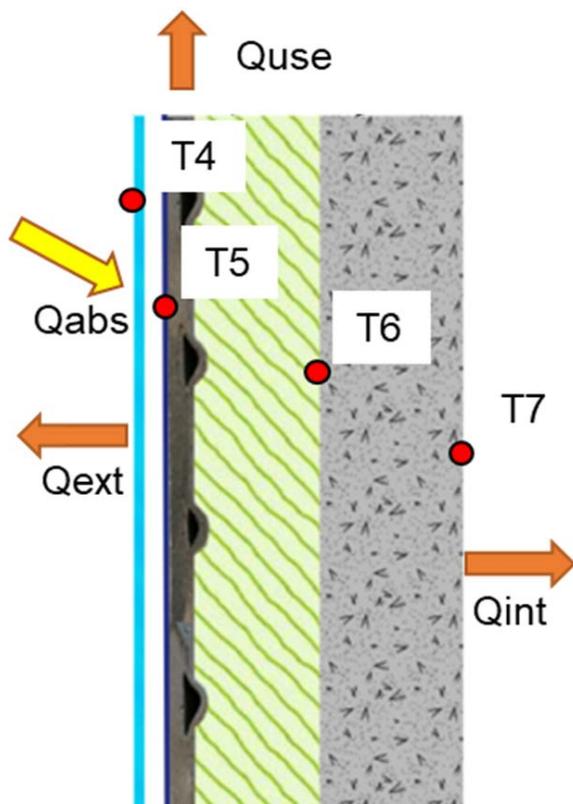


Abbildung 169: Skizze von TABSOLAR® Premium mit Bilanzhülle

Tabelle 13: Übersicht über die anhand von FEM-Simulationen bestimmten thermischen Widerstände

Resistance	Value	Unit
R5	0.0106	$\text{m}^2 \text{ K}/\text{W}$
R6	4.0000	$\text{m}^2 \text{ K}/\text{W}$
Rfc	0.0020	$\text{m}^2 \text{ K}/\text{W}$
R_{total}	4.0126	$\text{m}^2 \text{ K}/\text{W}$

Tabelle 14: Übersicht über optische Parameter

Configuration	Variation	Glazing					Absorber		
		ϵ	T_{0°	T_{60°	R_{0°	R_{60°	ϵ	α	
Design	No cover	0	1	1	0	0			
	Grey colored concrete						0.95	0.89	
Economy	K-glass	Front	0.84	0.704	0.601	0.106	0.191		
		Back	0.173	0.704	0.601	0.118	0.202		
	Grey colored concrete						0.95	0.89	
Premium	2xAR iron-free	Front	0.84	0.941	0.845	0.041	0.115		
		Back	0.84	0.941	0.845	0.041	0.115		
	Spectrally selective						0.05	0.95	

Tabelle 15: Übersicht über die Parameter der stationären Simulation

Inputs		Parameters	
Name	Value	Name	Value
Temperature Outdoor [°C]	25	Collector Field Area [m ²]	1
Solar Zenith Angle [°]	90	EdgeLossControl	Off=no edge effects
Solar Azimuth Angle [°]	0	RadConst	1=True = constant Irradiance
Direct Radiation [W/m ²]	1000	Cp Fluid [J/Kg K]	4187
Diffuse Radiation [W/m ²]	0	Number of Collectors in Series	1
Latitude [°]	50	ControlMode	2=constantMassFlow
Longitude [°]	-8.6	Collector Height [m]	1
Site Elevation [m]	92	ThermalCapFlag	Off=no thermal capacities
Ground Reflectance	0.2	R5 [W/m ² K]	0.0106
Mass Flow Fluid Inlet [Kg/s m ²]	0.02	R6 [W/m ² K]	4
Temperature Room [°C]	25	Rfc [W/m ² K]	0.002
Collector Slope [°]	90	hext [W/(m ² K)]	25
Collector Azimuth [°]	0	Plate Spacing [m]	0.04

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse einer dynamischen Simulation der drei TABSOLAR®-Produktfamilien sowie eines hinterlüfteten Flachkollektors und einer weißen Wand als Referenzen. Die Wärme, die der Flachkollektor über seine Rückseite an die Hinterlüftung ab-

gibt, führt zu einem geringeren Ertrag Q_{use} als jenem der Produktfamilie *Premium*, die deutlich geringere Rückseitenverluste Q_{int} hat. Die Abdeckscheibe der Produktfamilie *Economy* führt zu einer geringeren absorbierten Energie Q_{abs} und damit auch zu einem geringeren Ertrag. Die Produktfamilie *Design* absorbiert viel Energie, aber hat auch hohe Verluste Q_{ext} an die Umgebung.

Tabelle 16: Ergebnisse einer Jahressimulation für die Produktfamilien TABSOLAR® *Design*, *Economy* und *Premium* sowie einen kommerziellen Flachkollektor und eine Wand ohne Solarthermiefunktion als Referenzen. Gezeigt sind die von dem Wandaufbau absorbierte Energie Q_{abs} , der solarthermische Ertrag Q_{use} , der Wärmestrom nach außen Q_{ext} und der Wärmestrom nach innen Q_{int}

	Q_{abs} [W/m ²]	Q_{use} [W/m ²]	Q_{ext} [W/m ²]	Q_{int} [W/m ²]
Design Type005	685,0	67,0	612,2	5,7
Economy Type006	484,2	188,5	275,2	20,5
Premium Type007	639,4	266,1	342,3	30,9
Ref. Coll	618,6	205,8	249,1	163,6
Ref. Wall	138,5		160,5	-22,0

Im Projekt TABSOLAR I wurden bereits Systemsimulationen für eine Solarkombi-Anlage (Warmwasser + Heizungsunterstützung) mit Fassadenkollektoren unter Verwendung simulierter Wirkungsgradkennlinien für ein Einfamilienhaus durchgeführt. Die Simulationen zeigten, dass sich für die Varianten TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Economy* gegenüber der sehr guten Referenzanlage nur geringe Einbußen ergaben: Für TABSOLAR® *Premium* wurde eine um 2,5 Prozentpunkte (entspricht 7,5 % relativ) geringere Einsparung (30,9 % anstatt 33,4 %) erzielt. Für TABSOLAR®-*Economy*-Kollektoren war die Einsparung um 5,3 Prozentpunkte (entspricht 15,9 % relativ) geringer als die Referenz (28,1 % anstatt 33,4 %). Die Einsparung wurde jeweils gegenüber einem System ohne Kollektoren mit Gasheizung berechnet.

Hinsichtlich der Systemeinbindung müssen TABSOLAR®-*Design*-Kollektoren anders behandelt werden als die Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Economy*. Während die beiden letztgenannten ähnliche Temperaturniveaus wie andere abgedeckte solarthermische Kollektoren erreichen und somit sowohl zur direkten Trinkwarmwasserer-

zeugung als auch zur direkten Heizungsunterstützung verwendet werden können, kann TABSOLAR® *Design* aufgrund der niedrigen erzeugbaren Temperaturen hauptsächlich als Quelle für eine Wärmepumpe eingesetzt werden. Eine direkte Trinkwarmwassererzeugung ist eventuell in den Sommermonaten möglich. Tabelle 17 stellt die verschiedenen Bruttokollektorerträge gegenüber.

Da bei der Simulation der ursprünglichen Wirkungsgradkennlinien (WKL) die geometrische Auslegung der großen TABSOLAR®-Elemente noch nicht bekannt war, wurde dort mit größeren Kanalquerschnitten und geringeren Kanalabständen gerechnet. Für TABSOLAR® *Design* wurde der Querschnitt an die aktuelle Auslegung angepasst und die WKL neu berechnet. Die neuen Werte sind in Tabelle 17 ebenfalls angegeben. Die WKL der anderen Kollektoren müssen für die weitere Simulationen nochmals berechnet werden, sofern noch keine Messungen vorhanden sind.

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass der Ertrag von TABSOLAR® *Design* bei niedrigen Temperaturen über dem der anderen Kollektoren liegen kann, wohingegen der Ertrag dieses Elements schon bei 25 °C sehr stark abnimmt.

Einschränkend für die Validität der simulierten WKL muss gesagt werden, dass das Modell, mit dem die WKL erstellt wurden, nur für abgedeckte Standard-Kollektoren validiert wurde. Für die TABSOLAR®-Kollektoren, insbesondere für die unabgedeckte Variante, müssen die Modelle anhand von Messungen überprüft werden. Mangels Messung wurde in den weiteren Simulationen jedoch mit der simulierten WKL gerechnet. Für die unabgedeckte Variante lieferte das Modell sehr hohe Werte für a_1 , d. h. die Wärmeverluste bei Kollektortemperaturen über der Umgebungstemperatur waren sehr groß. Zieht man den Vergleich zu anderen unabgedeckten thermischen Kollektoren oder photovoltaisch-thermischen Kollektoren, könnten die Wärmeverluste möglicherweise überschätzt sein.

Breibt man den Kollektor unter Umgebungstemperatur, wandeln sich hohe Wärmeverluste in (Umgebungs-)Wärmegewinne. Für den Einsatz als Quelle für eine Wärmepumpe könnte es daher vorteilhaft sein, TABSOLAR® *Design* entsprechend auszulegen und Maßnahmen zur Erhöhung von a_1 , bzw. der Wärmegewinne bei Betrieb unter Umgebungstemperatur, vorzunehmen, wie z. B. von Leibfried et al. gezeigt [1].

Tabelle 17: Voraussichtliche Bruttokollektorerträge der TABSOLAR®-Produktfamilien in [kWh/(m²a)] bei 45° und 90° Anstellwinkel, jeweils bei verschiedenen Kollektormitteltemperaturen mit Ausrichtung nach Süden am Standort Würzburg berechnet mit ScenoCalc Ver. 6.0

	Anstellwinkel	10 °C	25 °C	50 °C
TABSOLAR® Premium altes Design	45°	1013	832	587
	90°	641	480	291
TABSOLAR® Economy altes Design	45°	941	750	499
	90°	594	426	236
TABSOLAR® Design WKLsimu, aktuelles Design $\eta_0 = 0,72$ $a_1 = 38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $a_2 = 0,605 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$	45°	1450	252	
	90°	1138	91	

Die Bruttokollektorerträge dienen als Orientierung, bei welchen Temperaturniveaus die verschiedenen Kollektoren besonders geeignet sind, spiegeln jedoch nicht die tatsächlichen Erträge in einem System wider.

Für die Systemsimulationen wurde zunächst ein Mehrfamilienhaus als vielversprechende Anwendung ausgewählt (Beschreibung siehe 2.5.3). Der Fokus wurde auf ein passendes System für die Produktfamilie TABSOLAR® *Design* gelegt, d. h. der Kollektor sollte als Quelle für eine Wärmepumpe dienen. Als »Worst Case« wurde davon ausgegangen, dass der Kollektor nicht vollkommen dampfdiffusionsdicht ist, weil sich Materialproben aus UHPC in Versuchen als leicht wasserdampfdurchlässig erwiesen. Unter anderem aus diesem Grund wurde ein Drainback-System, das mit Wasser als Wärmeträger betrieben wird, ausgewählt. Der Kollektor kann daher aus Frostschutzgründen nur ab einer Kollektortemperatur von 5 °C betrieben werden. Um die Wärmepumpe auch bei niedrigeren Temperaturen betreiben zu können, wurde ein Eisspeicher zwischengeschaltet. Dies bietet weitere Vorteile wie z. B. die Genehmigungsfreiheit im Gegensatz zu Erdbohrungen und die konstante Temperatur von 0 °C auch bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C. An dieser Stel-

le ist anzumerken, dass nicht getestet wurde, ob Glykol ebenfalls das UHPC durchdringen kann. Es ist gut möglich, dass das größere Molekül die Betonmatrix nicht durchdringen kann und somit Glykol oder ein anderes Frostschutzmittel gegebenenfalls verwendet werden könnte. Der Eisspeicher könnte in diesem Fall deutlich kleiner ausfallen oder bei ausreichenden Kollektorflächen sogar gänzlich entfallen. In Simulationen mit Photovoltaisch-Thermischen (PVT-)Kollektoren reichte ein Kollektorfeld als alleinige Quelle aus [2].

In Abbildung 170 und Abbildung 171 sind schematisch die simulierten Systeme dargestellt. Die Simulationen wurden mit der Software Dymola – Dassaults Systems®/Modelica durchgeführt.

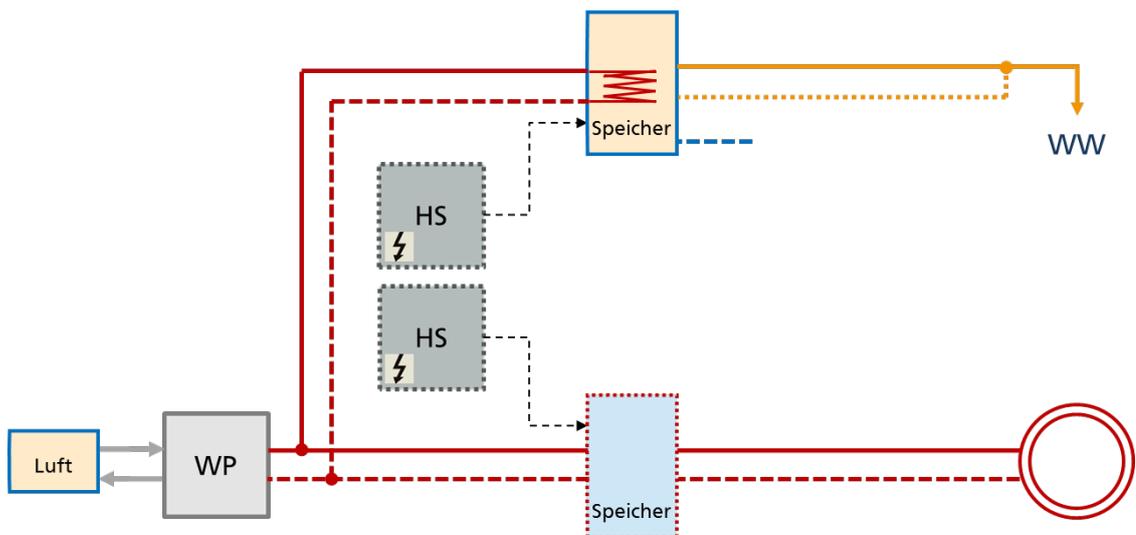


Abbildung 170: Schematische Darstellung des simulierten Systems für die Sanierungspfade 1 und 2 aus Abbildung 174

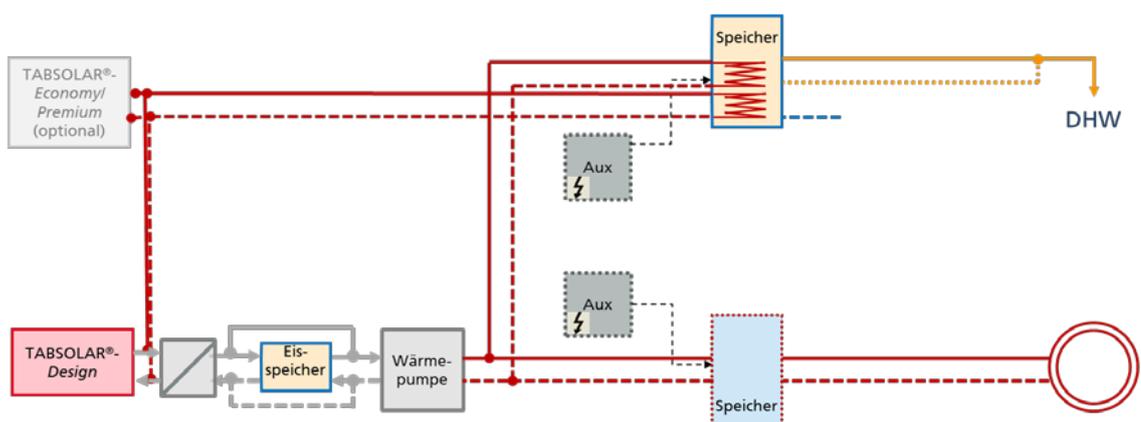


Abbildung 171: Schematische Darstellung des simulierten Systems für Sanierungspfad 3 aus Abbildung 174

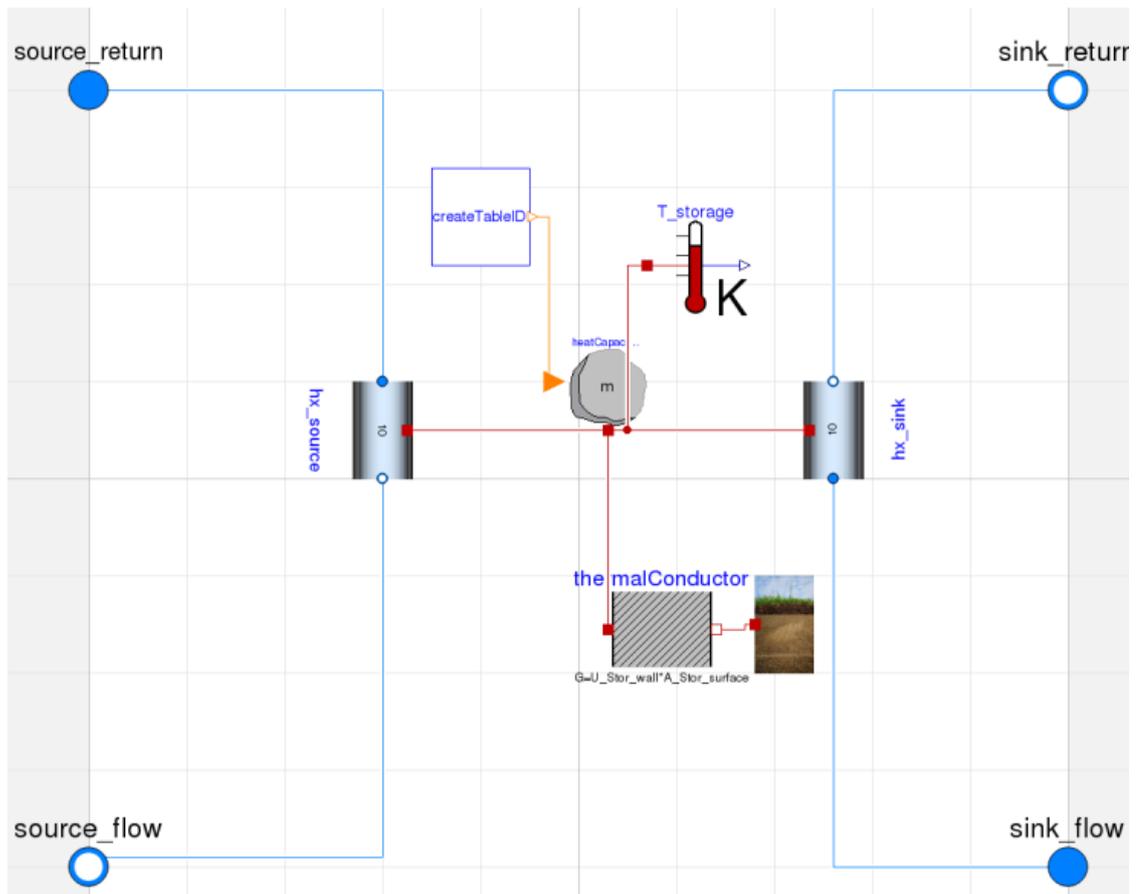


Abbildung 172: Vereinfachtes Eisspeicher-Modell, Modelica-Screenshot

Für den Eisspeicher wurde ein vereinfachtes Modell, das schematisch in Abbildung 172 dargestellt ist, für dieses Projekt entwickelt. Das Modell besteht aus zwei Wärmeübertragern und einem modifizierten Kapazitätsmodell, in dem die spezifische Enthalpie im Bereich des Phasenwechsels von Wasser über eine externe Datei eingelesen wird. Über einen Wärmewiderstand, der sich über die Mantelfläche und den U-Wert der Eisspeicherwand zu Erde ergibt, ist das modifizierte Kapazitätsmodell an die Temperatur des Erdreichs angebunden. Der Eisspeicher wurde so ausgelegt, dass gerade keine vollkommene Vereisung in den Wintermonaten stattfindet. Der U-Wert wurde mit $7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen. Für die Übertragungsfläche wurde die Innenseite des Eisspeichers verwendet, der als quaderförmig mit einer Stirnfläche von $2,5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ und einer Länge von $6,7 \text{ m}$ angenommen wurde. Im gegebenen System wurde mit einer Größe von 50 m^3 gerechnet. Dies mag zunächst sehr groß erscheinen, jedoch wurden im Projekt HighIce vom SPF in Rapperswil ähnliche Dimensionierungen für Einfamilienhäuser mit einem detaillierten und validierten Eisspeichermodell ermittelt. Ein Auszug aus dem Endbericht des Projekts zur Dimensionierung ist in Abbildung 173 zum Vergleich dargestellt. In diesem Bericht wird zudem ein gebautes Eisspeicher-System für einen Kindergarten mit einem Wärmebedarf von ca. 35 MWh (zum Vergleich: hier betrachtetes MFH hat einen Wärmebedarf von 44 MWh),

das mit einem 75 m³ großen Speicher ausgestattet ist, beschrieben und zur Validierung verwendet.

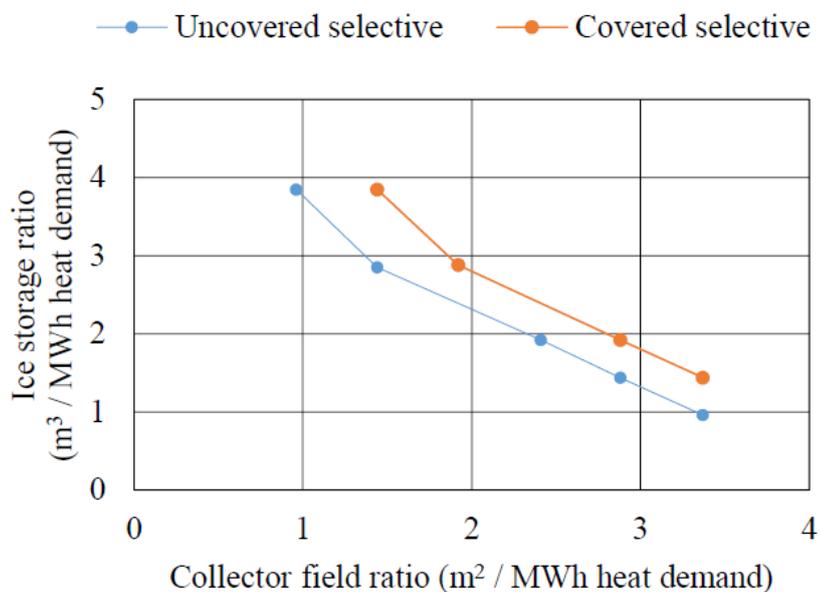


Abbildung 173: Dimensionierung von Eisspeicher und Kollektorfeld (unabgedeckt, spektralselektiv und abgedeckt, spektralselektiv), Auszug aus [3]

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Jahressimulation am Standort Potsdam dargestellt. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Lebenszyklusanalyse (LCA).

Tabelle 18: Ergebnisse Jahressimulation

	Sanierungspfade 1 und 2	Sanierungspfad 3 (TABSOLAR® Design)
Jahresarbeitszahl (JAZ)	2,8	3,3
Benötigte Energie für die Wärmepumpe und die Nachheizung	19,9 MWh	16,3 MWh

2.5.3 Life Cycle Assessment (LCA)

Es wurden zunächst verschiedene mögliche Zielstellungen für die Lebenszyklusbetrachtungen von solarthermischen Kollektoren im Allgemeinen ausgearbeitet und die jeweiligen Systemgrenzen in Tabelle 19 gegenübergestellt. Für die Produktentwicklung wird Ziel Nr. 1 verfolgt, um mögliches Verbesserungspotenzial aufzuzeigen. Da es sich bei den

TABSOLAR®-Kollektoren um Fassadenelemente handelt, ist aber insbesondere Ziel Nr. 4 von Bedeutung.

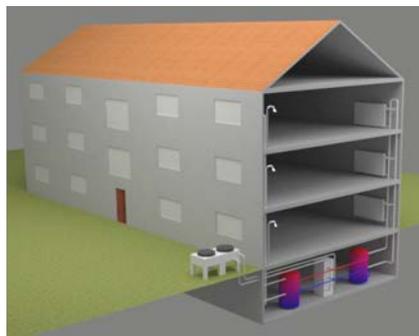
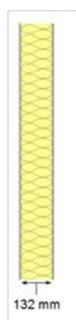
Dafür wurde zunächst eine für TABSOLAR®-Kollektoren vielversprechende Anwendung identifiziert: Als Referenzfall wurde die Sanierung eines mittleren Mehrfamilienhauses der Baualtersklasse II (1958-78) nach der Klassierung des Abschlussberichts von AP 1.1 des Projektverbundes LowEx im Bestand [4] am Referenzstandort Potsdam ausgewählt. Die verfügbaren Fassadenflächen sind in Tabelle 20 gelistet. Für dieses Mehrfamilienhaus wurden drei Sanierungspfade nach EnEV 2014/16 wie in Abbildung 174 definiert. Pfad 1 stellt mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und einer Luftwärmepumpe den ökonomischen Benchmark dar, Pfad 2 bildet mit einer vorgehängten hinterlüfteten passiven Fassade und ebenfalls einer Luftwärmepumpe den architektonischen Benchmark, und Pfad 3 zeigt TABSOLAR® *Design* als vorgehängte hinterlüftete Fassade, die in Kombination mit einem Eisspeicher die Quelle für die Wärmepumpe darstellt. Der Wärmebedarf nach Sanierung beträgt $64 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, insgesamt ergeben sich 36,2 MWh für Heizung und 7,8 MWh für Trinkwarmwasser. Die Pfade wurden hinsichtlich Primärenergie und Treibhauspotenzial (Global warming potential, GWP 100a) verglichen.

Tabelle 19: Verschiedene LCA-Ziele im Zusammenhang mit energiebereitstellenden Gebäudehüllenelementen (z. B. solarthermische Kollektoren) mit den dazugehörigen Systemgrenzen

Nr.	LCA-Ziel	Systemgrenzen
1	Identifikation von Hot-Spots in den Umwelteinwirkungen im Lebenszyklus eines Kollektors	Herstellung und Entsorgung Kollektoren
2	Vergleich verschiedener Kollektoren mit gleichem Wärmeversorgungssystem und gleicher Anwendung	
2a	Verschiedene Kollektorflächen, verschiedene Wärmeerträge	Herstellung und Entsorgung Kollektoren + Wärmeertrag in der Nutzungsphase
	2b Gleiche Kollektorfläche	Herstellung und Entsorgung Kollektoren + Wärmeertrag in der Nutzungsphase
	2c Gleicher Ertrag	Herstellung und Entsorgung Kollektoren
3	Vergleich verschiedener Wärmeversorgungssysteme für eine gegebene Anwendung	Herstellung und Entsorgung der Kollektoren (falls vorhanden) und des Wärmeversorgungssystems + Gesamtwärmebedarf in der Nutzungsphase
4	Vergleich verschiedener Gebäudehüllen mit unterschiedlichen Wärmeversorgungssystemen	Herstellung und Entsorgung der Gebäudehülle und des Wärmeversorgungssystems + Gesamtwärmebedarf in der Nutzungsphase

Tabelle 20: Übersicht Flächen mittleres Mehrfamilienhaus

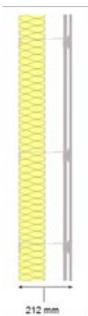
	Fassadenfläche gesamt [m ²]	Opake Fassadenfläche [m ²]	Fensterfläche [m ²]
Nord	188,1	163,7	24,3
West	96,0	70,8	25,2
Süd	188,1	156,6	31,5
Ost	96,0	71,0	25,1



Pfad 1:

Ökonomischer Benchmark

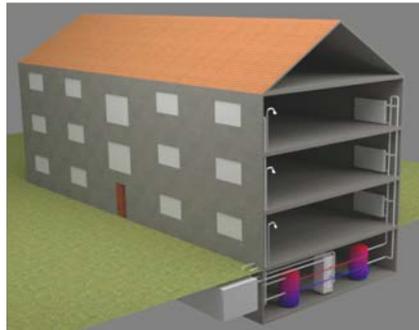
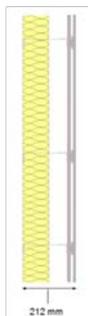
Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Luftwärmepumpe



Pfad 2:

Architektonischer Benchmark

Vorgehängte hinterlüftete, passive UHPC-Fassade mit Luftwärmepumpe



Pfad 3:

TABSOLAR®-Design-System

Vorgehängte hinterlüftete, gedämmte TABSOLAR®-Design-Fassade mit Eispeicher und Wasserwärmepumpe

Abbildung 174: Visualisierung dreier verschiedener Sanierungspfade eines mittleren Mehrfamilienhauses der Baualtersklasse II (1958-78)

Es wurde davon ausgegangen, dass das Wärmeverteilsystem bestehen bleibt und nur das System zur Bereitstellung der Wärme erneuert wird. Außerdem wird im Rahmen der Sa-

nierung die Fassade erneuert: Der ursprünglich angenommene U-Wert von 1,13 W/(m²K) soll auf 0,23 W/(m²K) gesenkt werden. Die anderen Maßnahmen zur Reduktion des Wärmebedarfs wie z. B. Dachdämmung sind bei allen drei Pfaden gleich und werden nur hinsichtlich des Wärmebedarfs in der Gebäudesimulation berücksichtigt.

Beschreibung der LCA-Daten

Alle Komponenten des Heizungssystems, die sich in den verschiedenen Pfaden unterscheiden, und die jeweilige Südfassade wurden mit Hilfe des Programms Umberto® und der Datenbank Ecoinvent V3.5 ökologisch inventarisiert.

Im Rahmen der Masterarbeit von C. Pouloupoulos [5] sowie in der anschließenden Projektzusammenarbeit wurde gemeinsam mit den Projektpartnern und externen Fachleuten eine Feldrecherche zu den Prozessen und Materialien der Herstellung von TABSOLAR®-Kollektoren durchgeführt, um diese mit Hilfe der in Ecoinvent verfügbaren Materialien und Prozesse zu modellieren.

In Tabelle 21 bis Tabelle 29 sind die verwendeten nutzerdefinierten Prozesse und Materialien beschrieben. Für die Namen der Datensätze wurden die englischen Originalnamen beibehalten, um eine Nachmodellierung zu erleichtern. Es wurde versucht, den jeweils passenden Datensatz zu verwenden, sofern vorhanden. Das Kürzel [DE] steht dabei für Deutschland, [GLO] für global und [RoW] für Rest-of-the-World, was seit der Ecoinvent Version 3.2 dem Datensatz für [GLO] entspricht. [RER] steht für Europa.

Alle Daten werden als »allocation cut-off« verwendet, d. h. dass Recyclingprozesse den nachfolgenden Produkten zugerechnet werden und keine Gutschrift erfolgt. Gibt es Marktdaten (»market for ...«), sind darin bereits Standard-Transportwege und ein üblicher Produktionsmix enthalten.

In Ecoinvent steht kein Datensatz für die Außenlufteinheit einer Luftwärmepumpe zur Verfügung. Im Ecoinvent-Bericht zur Datenbeschreibung von Wärmepumpensystemen [6] wird der existierende Datensatz für eine 10-kW-Erdwärmepumpe wegen erhöhten Material- und Kältemittleinsatzes mit dem Faktor 1,6 skaliert, um die Daten für die Luftwärmepumpe zu generieren. Für andere Leistungsklassen wird gemäß der Leistung skaliert. Dieser Vorgehensweise wurde hier gefolgt. Der Unterschied der Systeme von Pfad 1 und 2 gegenüber Pfad 3 wurde mit dem Datensatz »heat pump production, brine-water, 10 kW

[CH]« und dem Faktor 0,6⁴ modelliert. Außerdem wurde gemäß der für die Anwendung nötigen Leistung (25 kW) mit dem Faktor 2,5 skaliert.

Für die Modellierung des notwendigen zusätzlichen Systems für Pfad 3 (MAG, Pumpe, Verrohrung, Transport, Verpackung) wurden die Angaben in den Berichten für Solarsysteme von Stucki und Jungbluth [7] [8] verwendet und angepasst.

Für die Dämmung in den Sanierungspfaden 2 und 3 wurde der Datensatz für Mineralwolle entsprechend den Daten aus Tabelle 27 inklusive des Datensatzes für die Entsorgung verwendet.

Der benötigte Strom wurde mit dem Datensatz »market for electricity, low voltage [DE]« modelliert. Dieser Datensatz basiert auf den IEA-Daten von 2014.

Der Eisspeicher wurde gemäß den Angaben in [3] modelliert und entsprechend skaliert.

Tabelle 21: Sachbilanz von 1 m² TABSOLAR® *Design*

Material/Prozess	Wert	Einheit
UHPC, mixed, custom	28,12	kg
deepdrawing UHPC, custom	1	m ²
market for glass fibre [GLO]	0,29	kg
fluid connectors, custom	3,4	unit
insulation, 0,05 m	6	kg
substructure, custom	1	m ²

⁴ Hier wurde nur der Mehranteil, den die Lufwärmepumpe gegenüber einer Erdwärmepumpe hat, berücksichtigt.

Tabelle 22: Sachbilanz von »1 m³ Ultrahochleistungsbeton, gemischt« basierend auf persönlicher Kommunikation mit T. Sablotny von G.tecz und den Rezeptangaben des Rezepts M1Q in [9]

Material/Prozess	Wert	Einheit
superplasticizer production, custom	28,6	kg
market for silica fume, densified [GLO]	230	kg
silica sand production [DE]	183	kg
market for tap water [Europe without Switzerland]	161	kg
cement production, Portland [Europe without Switzerland]	733	kg
gravel and sand quarry operation [RoW]	1008	kg
market for electricity, low voltage [DE]	11	kWh
market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	605362	metric ton * km

Tabelle 23: Sachbilanz von 1 Kilogramm »Superplasticizer production, custom« basierend auf [10]

Material/Prozess	Wert	Einheit
maleic anhydride production by direct oxidation of n-butane [RER]	0,1	kg
ethylene glycol production [RER]	0,2	kg
triazine-compound production, unspecified [RER]	0,01	kg
market for electricity, medium voltage [DE]	0,0405	kWh
chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell [RER]	0,11	kg
water production, deionised, from tap water, at user [RoW]	0,45	kg
hydrogen peroxide production, product in 50% solution state [RER]	0,03	kg
acrylic acid production [RER]	0,1	kg

Tabelle 24: Sachbilanz für 1 m² Membranvakuum-Tiefziehen von UHPC (»deepdrawing UHPC, custom«). Annahme: Membran kann zweimal benutzt werden und wiegt 200 g. Die Serienproduktionsanlage mit den Tiefziehwerkzeugen wurde hier noch nicht berücksichtigt, zumal noch keine Daten dafür vorliegen, weil bisher nur eine Technikumsanlage für manuelle Fertigung existiert.

Material/Prozess	Wert	Einheit
market for silicone product [RER]	0,1	kg
market for electricity, low voltage [DE]	1,2	kWh

Tabelle 25: Sachbilanz für einen Fluidanschluss («fluid connectors, custom«)

Material/Prozess	Wert	Einheit
market for steel, chromium steel 18/8 [GLO]	0,1523	kg
drawing of pipe, steel [RER]	0,0033	kg
market for metal working, average for steel product manufacturing [GLO]	0,149	kg
market for silicone product [RoW]	0,004	kg

Tabelle 26: Sachbilanz für 1 m² Unterkonstruktion für vorgehängte, hinterlüftete Fassade (passiv oder aktiv) («substructure, custom«). Darin enthalten sind Agraffen, Abstandhalter (TABSOLAR®-Agraffe), Traversprofile, Unterkonstruktion vertikale L-Profile, Halterung nach Abbildung 175.

Material/Prozess	Wert	Einheit
aluminium, production mix, wrought alloy, at plant [RER]	4,82	kg
section bar extrusion, aluminium [RER]	4,82	kg

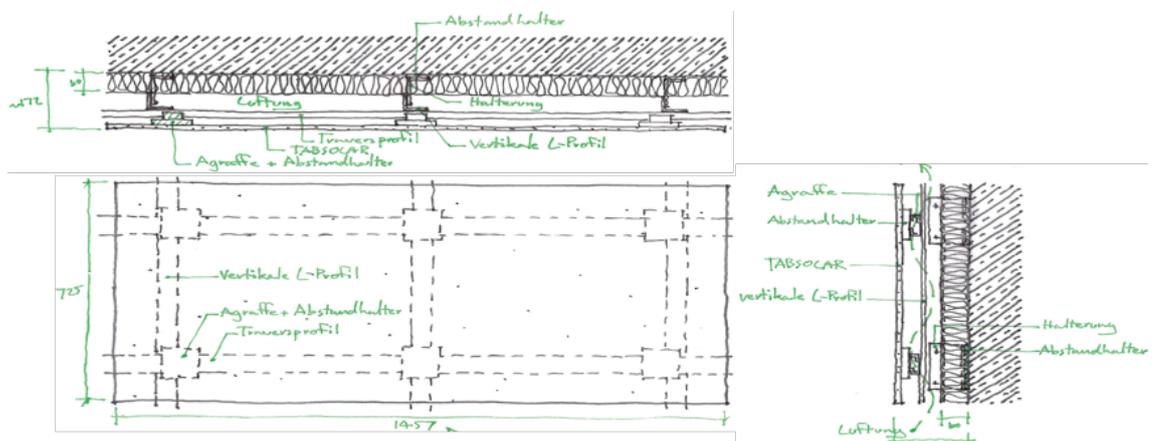


Abbildung 175: Zeichnung zur Darstellung der für TABSOLAR® geplanten Unterkonstruktion

Tabelle 27: Sachbilanz von 1 m² Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Mineralwolle (120 mm) mit einem U-Wert von 0,29 W(m²K) für die Sanierung basierend auf den Datenblättern [11], [12], [13], [14] und persönlicher Kommunikation mit Dr. Thomas Loewenstein von Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH

Material/Prozess		Wert	Einheit
Material für WDVS Mineralwolle 120 mm	market for adhesive mortar [GLO]	10,5	kg
	market for stone wool, packed [GLO]	14,4	kg
	market for base plaster [GLO]	6	kg
	market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded [GLO]	0,1815	kg
	market for cover plaster, mineral [GLO]	2,9	kg
Produktion	market for plaster mixing [GLO]	19,4	kg
Lebensende	treatment of waste cement in concrete and mortar, collection for final disposal [Europe without Switzerland]	16,5	kg
	treatment of waste mineral wool, collection for final disposal [Europe without Switzerland]	14,4	kg
	treatment of waste mineral plaster, collection for final disposal [RoW]	2,9	kg
	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration [RoW]	0,1815	kg

Tabelle 28: Sachbilanz von 1 m² spektralselektiver Beschichtung von UHPC. Dieser Datensatz basiert auf dem Datensatz »selective coating, copper sheet, sputtering [DE]«. Der Wert des benötigten Stroms wurde verdoppelt, da die Vakuum-Pumpe wesentlich länger für ein ausreichendes Vakuum pumpen musste. Außerdem wurden Aluminium und Titan-dioxid, die in dem Schichtaufbau vorkommen, hinzugefügt.

Material	Wert	Einheit
aluminium, primary, ingot	0,0004065	kg
argon, liquid	0,00328	kg
Chromium	0,0074	kg
Copper	0,0818	kg
corrugated board box	0,0177	kg
diesel, burned in building machine	0,225	MJ
electricity, medium voltage	6,94	kWh
kraft paper, bleached	0,000555	kg
light fuel oil	0,0062	kg
lubricating oil	0,000773	kg
metal coating facility	0,000000333	unit
nitrogen, liquid	0,00182	kg
oxygen, liquid	0,000909	kg
polyethylene, low density, granulate	0,000518	kg
tap water	7,236	kg
Tin	0,00862	kg
titanium dioxide	0,000114	kg

Tabelle 29: Sachbilanz der Vortrocknung von 1 m² TABSOLAR[®]-Absorber gemäß der aktuellen Praxis am Fraunhofer ISE. Dieser Prozess muss überarbeitet werden, sobald bessere Daten zur benötigten Vortrocknung existieren.

Material	Wert	Einheit
market for electricity, low voltage [DE]	14,8	kWh

Ergebnisse

In Abbildung 176 wird der Primärenergieaufwand für verschiedene Varianten der TABSOLAR[®]-Produktfamilien, einen Standard-Kollektor sowie eine passive UHPC-Verkleidung jeweils als vorgehängte hinterlüftete Fassade neben einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Mineralwolle miteinander verglichen. Für die TABSOLAR[®]-Produktfamilien wurden TABSOLAR[®] *Design* mit und ohne spektralselektive Beschichtung, TABSOLAR[®] *Economy*, TABSOLAR[®] *Premium* mit einer Variante, in der die Beschichtung in einer bestehenden kommerziellen Stückgut-Beschichtungsanlage in Mikkeli (Finnland) durchgeführt wird, dargestellt. Im Vergleich zum Standard-Kollektor ist der Anteil für die spektralselektive Beschichtung bei den TABSOLAR[®]-Kollektoren sehr groß. Das liegt an der für UHPC notwendigen Vortrocknung und der erhöhten Pumpenenergie für die Evakuierung. Dieser Mehrbetrag lässt sich jedoch vermutlich durch verbesserte Trocknungsprozesse stark reduzieren. Außerdem spielt das Alter des Betons eine wesentliche Rolle; die TABSOLAR[®]-Elemente sollten mehrere Wochen aushärten, bevor sie beschichtet werden, was z. B. bei den Beschichtungen der großen TABSOLAR[®]-Elemente für die Messe BAU 2019 jedoch nicht gegeben war. Des Weiteren fällt im Vergleich des Primärenergieaufwands der große Anteil des Kollektorrahmens beim Standard-Kollektor auf. Hier ist anzumerken, dass eine wahrscheinlich benötigte Abdeckleiste zwischen den Kollektoren und am Rand des Feldes bei den TABSOLAR[®]-Kollektoren mangels Daten noch nicht berücksichtigt wurde. Außerdem wurde der Standard-Kollektor mit einem Rahmen aus Aluminium modelliert. Würde dieser in der Fassade ggf. aus Holz gebaut, würde sich dieser Anteil deutlich reduzieren.

Das WDVS hat in der Herstellung insgesamt den geringsten Primärenergieaufwand, kann jedoch genau wie die passive UHPC-Verkleidung nicht zur Energiegewinnung verwendet werden. Für den fairen Vergleich müssen hier also die Einsparungen in der Nutzungsphase gegengerechnet werden.

Für das Treibhauspotenzial (Abbildung 177) gelten die gleichen Aussagen, die Anteile der jeweiligen Prozesse und Materialien sind nur leicht verschieden.

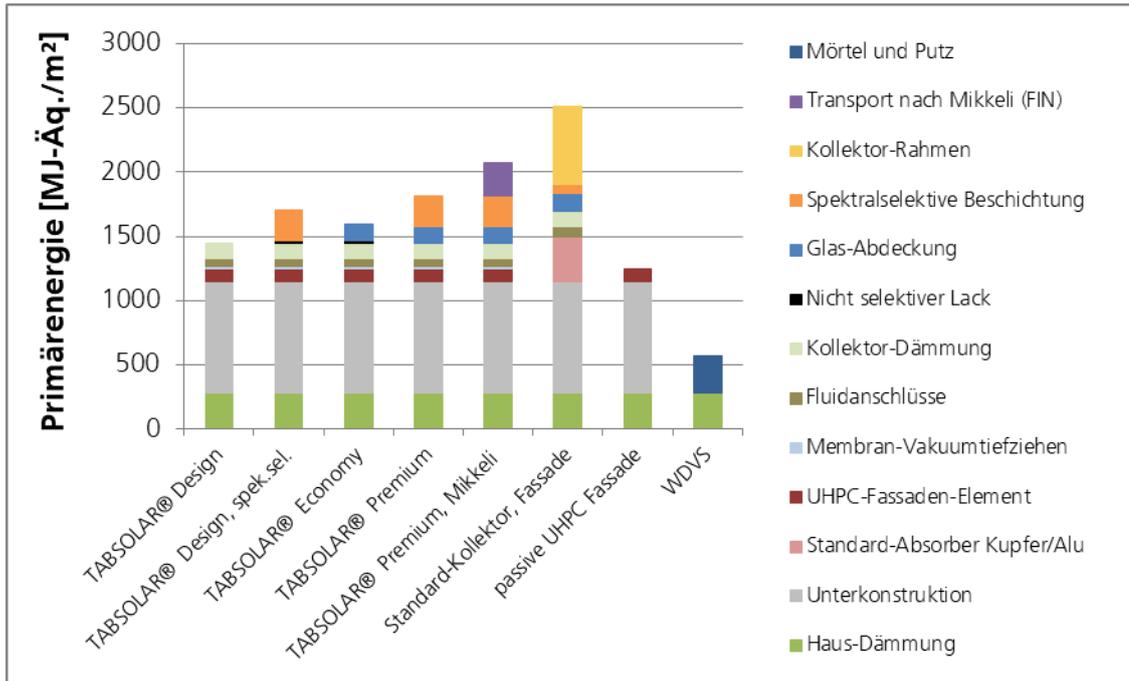


Abbildung 176: Vergleich der für die Herstellung und Entsorgung benötigten Primärenergie verschiedener Varianten der TABSOLAR®-Produktfamilien mit einer passiven UHPC-Verkleidung und einem Standard-Kollektor, jeweils als vorgehängte hinterlüftete Fassade, sowie einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

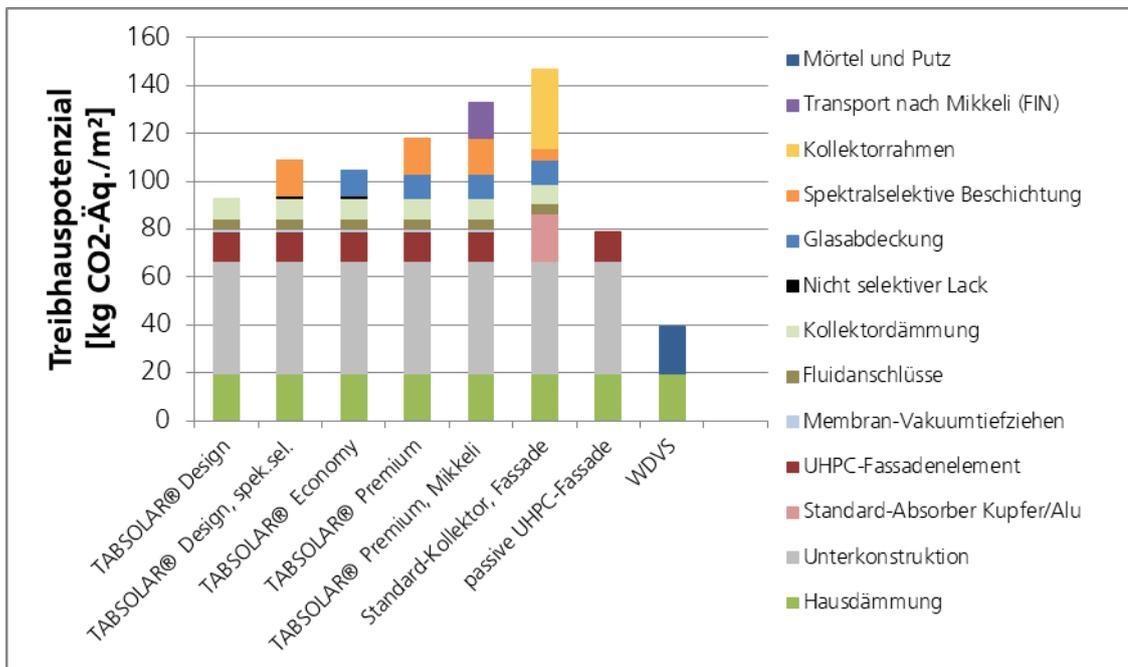


Abbildung 177: Vergleich des bei der Herstellung und Entsorgung entstehenden Treibhauspotenzials verschiedener Varianten der TABSOLAR®-Produktfamilien mit einer passiven UHPC-Verkleidung und einem Standard-Kollektor, jeweils als vorgehängte hinterlüftete Fassade, sowie einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

In Abbildung 178 und Abbildung 179 sind die Ergebnisse für den kumulierten Primärenergiebedarf bzw. das Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 25 Jahren aufgetragen. Gegenüber dem Sanierungspfad 1 können 12 % des kumulierten Primärenergiebedarfs und 8 % des Treibhauspotenzials eingespart werden, gegenüber dem Sanierungspfad 2 können 14 % des kumulierten Primärenergiebedarfs und 11 % des Treibhauspotenzials eingespart werden. Da bei der Herstellung von Zement, z. B. für die Wand des Eisspeichers, große Mengen CO₂ anfallen, fallen die Einsparungen im Treibhauspotenzial geringer aus. In der Zukunft könnte hier durch neue Technologien in der Zementherstellung oder durch den Einsatz von materialsparendem UHPC im Eisspeicher die produktionsbedingte Belastung gesenkt werden.

FAZIT: Diese Ergebnisse sind sehr vielversprechend. Zum einen werden sich die Amortisationszeiten vermutlich durch eine Optimierung des Systems von Pfad 3 (mit den TABSOLAR®-*Design*-Elementen) noch verringern, z. B. indem andere Wärmeträgerflüssigkeiten zugelassen werden. Zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass es möglich ist, mit einer Fassade aus TABSOLAR® *Design* in Kombination mit einem Eisspeicher eine Sanierung für ein Mehrfamilienhaus durchzuführen, ohne auf weitere Quellen für die Wärmepumpe angewiesen zu sein. Das heißt, dass man auf eine sperrige Außenlufteinheit samt ihrer oft erheblichen Geräuschbelastung verzichten kann und gleichzeitig eine sehr hochwertige, gestaltbare Fassade erhält. Eine Erdwärmepumpe wird in Zukunft auch in den Vergleich einbezogen werden. Hier werden die Einsparungen vermutlich noch geringer sein. Gerade im urbanen Bereich oder in bestimmten Regionen kann der Einsatz von Erdwärme jedoch nicht oder nur eingeschränkt erfolgen, und eine Luftwärmepumpe stellt die wesentliche Wettbewerbstechnologie zu der hier vorgestellten Lösung dar, sofern auf Gas verzichtet werden soll.

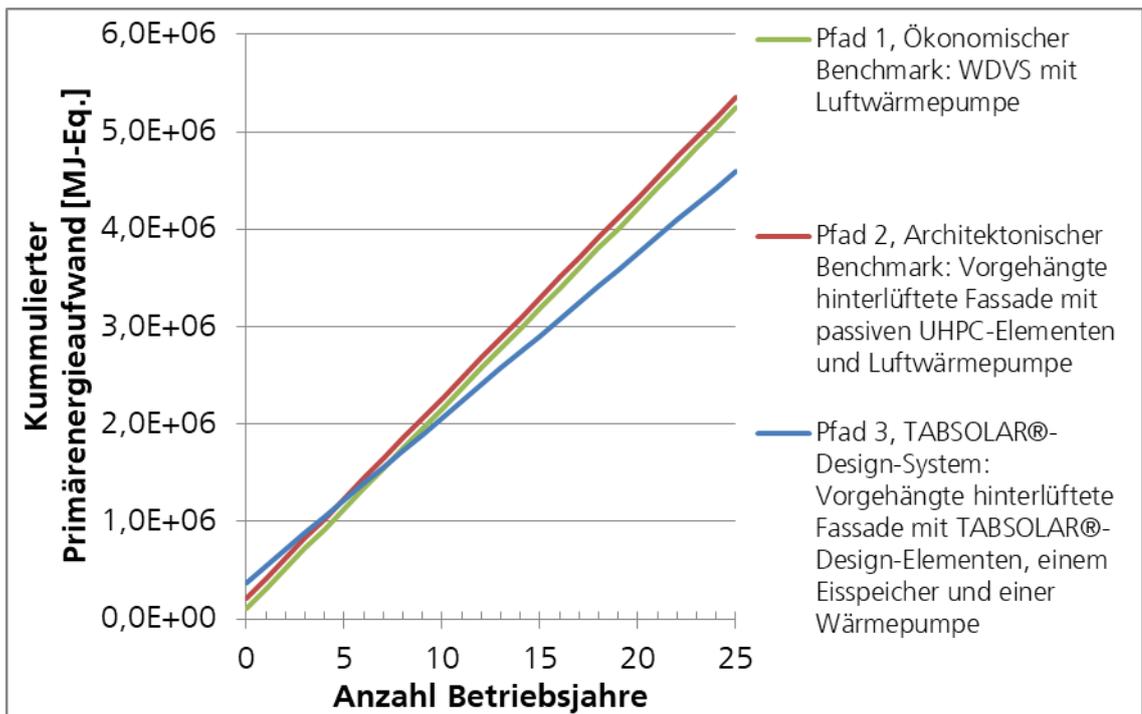


Abbildung 178: Kumulierter Primärenergieaufwand für die drei Sanierungspfade über einen Zeitraum von 25 Jahren

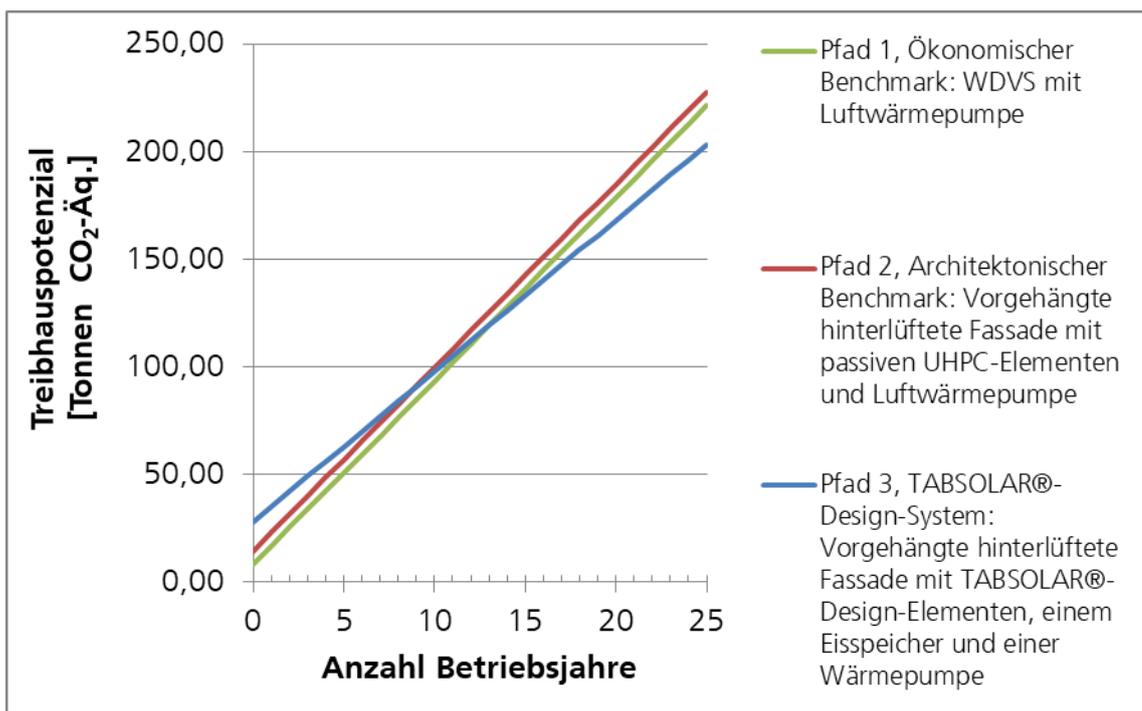


Abbildung 179: Treibhauspotenzial (GWP100) für die drei Sanierungspfade über einen Zeitraum von 25 Jahren

2.5.4 Wirtschaftlichkeitsberechnungen

In Abbildung 180 sind mittlere Kostenschätzungen pro Quadratmeter für die Kollektorvarianten TABSOLAR® *Design* und *Premium*, in Abbildung 181 für TABSOLAR® *Heat & Cool* (Heiz- bzw. Kühlelemente in Innenräumen) pro 125 Watt Wärmeleistung, jeweils in Abhängigkeit der Gewinnmarge in Prozent des Herstellpreises dargestellt.

In den Kalkulationen für beide Kollektorvarianten und TABSOLAR® *Heat & Cool* werden Anlagenkosten (inklusive Mischer und Silo) von 2 Mio. € mit einer Abschreibungsdauer von 5 Jahren, einem kalkulatorischen Zinssatz von 5 % und einer Jahresproduktion von zunächst 30.000 m² berücksichtigt. Außerdem sind Materialkosten für UHPC (wegen Kleinmengenannahme vorerst 10,50 €/m², Potenzial: ca. 5 €/m² ab 375.000 m²/a), Verankerung (12 €/m²) und Fluidanschlüsse (24 €/m²), Lohnkosten (10 €/m²), Mietkosten für Gebäude (5 €/m²) sowie eine Schutzbeschichtung (8 €/m²) enthalten.

Bei der Variante TABSOLAR® *Premium* sind zusätzlich Kostenannahmen für Wärmedämmung und Verglasung (40 €/m² [15]) und für eine spektralselektive Schicht (10 €/m²) enthalten.

Bei dem Vergleich mit Standard-Kollektoren muss berücksichtigt werden, dass TABSOLAR® *Premium* gemäß Simulationen eine Minderleistung von ca. 7,5 % aufweist (30,9 % anstatt 33,4 %). Diese kann in bestimmten Bereichen durch vergrößerte Kollektorfläche und dadurch erhöhte Kosten ausgeglichen werden. In der genannten Simulationsstudie konnten beispielsweise mit 20 m² TABSOLAR® *Premium* 34,8 % Einsparung erreicht werden. Hier muss allerdings noch berücksichtigt werden, dass diese ersten Simulationsrechnungen auf einem alten Kanaldesign beruhten. Durch den im aktuellen Design etwas größeren Kanalabstand und den geringeren Kanalquerschnitt erhöht sich der Druckverlust des Absorbers zum Fluid etwas, und der Ertrag fällt etwas geringer aus. Diese Korrektur wird jedoch die generellen Aussagen voraussichtlich nicht verändern.

Wie in den beiden vorangegangenen Abschnitten vorgestellt werden für TABSOLAR® *Design* andere Systemkonzepte benötigt. Verglichen werden müssen also die Kosten der jeweiligen Fassade zusammen mit dem passenden System. Da Eisspeicher zurzeit keine Massenware und insbesondere Übergößen oft Spezialanfertigungen sind, wird sich der vorgeschlagene Sanierungspfad 3 in einem Zeitraum von 25 Jahren vorerst nicht gegenüber den Sanierungspfaden 1 oder 2 wirtschaftlich amortisieren. Der architektonische und akustische Mehrwert ist dabei jedoch noch nicht eingepreist. Tut man dies, kann dies die Wirtschaftlichkeit möglicherweise zugunsten des TABSOLAR®-*Design*-Systems verschieben. Hier ist die Frage, wieviel der Kunde für diesen Mehrwert zu zahlen bereit ist. Durch Op-

timierung des Systems, z. B. durch andere Wärmeträgerfluide, kann die Größe des Eisspeichers vermutlich noch reduziert oder womöglich gänzlich weggelassen werden, was auch zu deutlich geringeren Kosten führt. Zudem bietet der Eisspeicher selbst noch Einsparpotenziale, z. B. durch einen Materialwechsel im Mantel von Normalbeton auf UHPC, Serienfertigung oder erhöhten Vorfertigungsgrad. So ist es denkbar, dass sich das TABSOLAR®-Design-System zukünftig mindestens gegenüber dem architektonischen Benchmark wirtschaftlich rechnet.

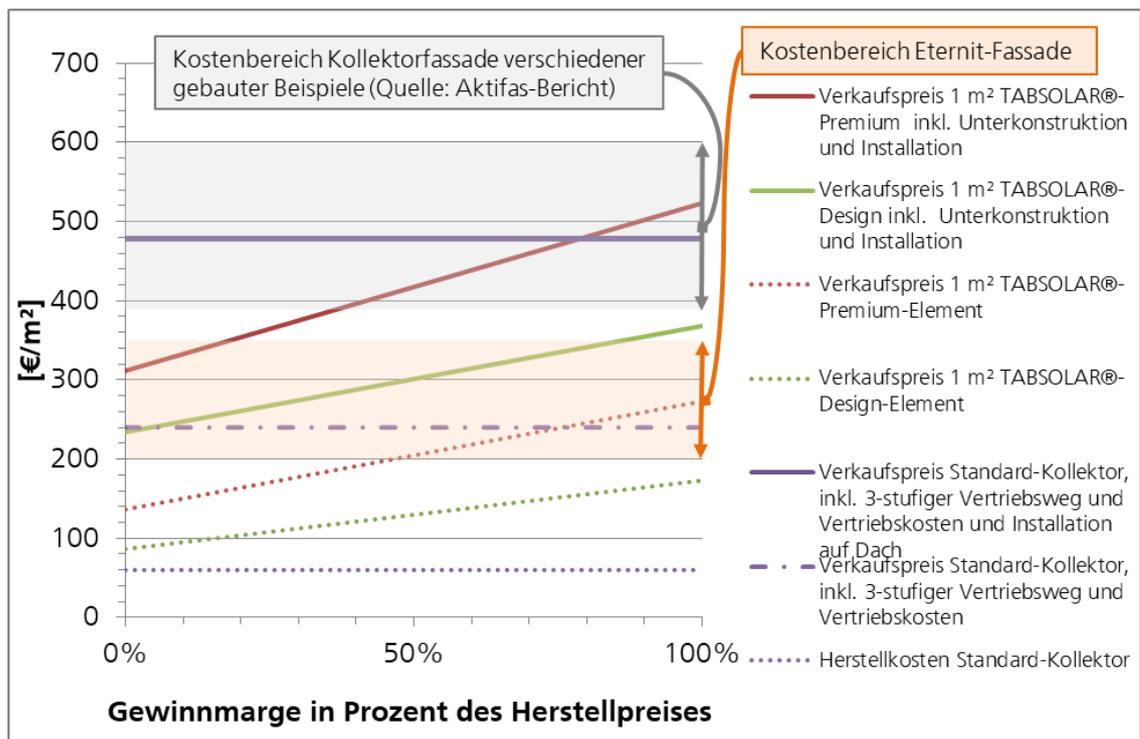


Abbildung 180: Mittlere Kostenschätzung für TABSOLAR®-Design- und TABSOLAR®-Premium-Kollektoren, jeweils ohne Unterkonstruktion und Installation (gepunktet) und mit Unterkonstruktion und Installation (durchgezogene Linien). In lila sind beispielhafte Kosten für einen Standard-Kollektor mit Aufdachmontage dargestellt [15]. Der grau hinterlegte Bereich zeigt den Kostenrahmen für verschiedene gebaute Kollektorfassaden [15], der orange hinterlegte Bereich den Kostenrahmen für Eternit-Fassaden.

Im Bereich der Kühl- und Heizdecken liegen aus dem Projekt TABSOLAR I bereits Messungen an vier kleinen Mustern für TABSOLAR® Heat & Cool vor. Bei einer Übertemperatur von 15 K wurde eine Leistung von umgerechnet 238 W/m² ermittelt (bei der Umrechnung der Messwerte wurden nicht durchströmte Bereiche berücksichtigt). Kann diese Leistung auch an größeren Elementen reproduziert werden, entspräche dies einer Mehrleistung von 90 % gegenüber der Referenz. Dies wirkt sich über die weniger benötigte Fläche proportional auf die Kosten aus. Der Vergleich in Abbildung 181 bezieht sich daher auf die Leistung. Die Referenzkühldecken erreichen im Heizbetrieb 125 Watt mit einem Quadrat-

meter, TABSOLAR® Heat & Cool erreicht diese Leistung voraussichtlich schon mit einer Fläche von 0,53 m².

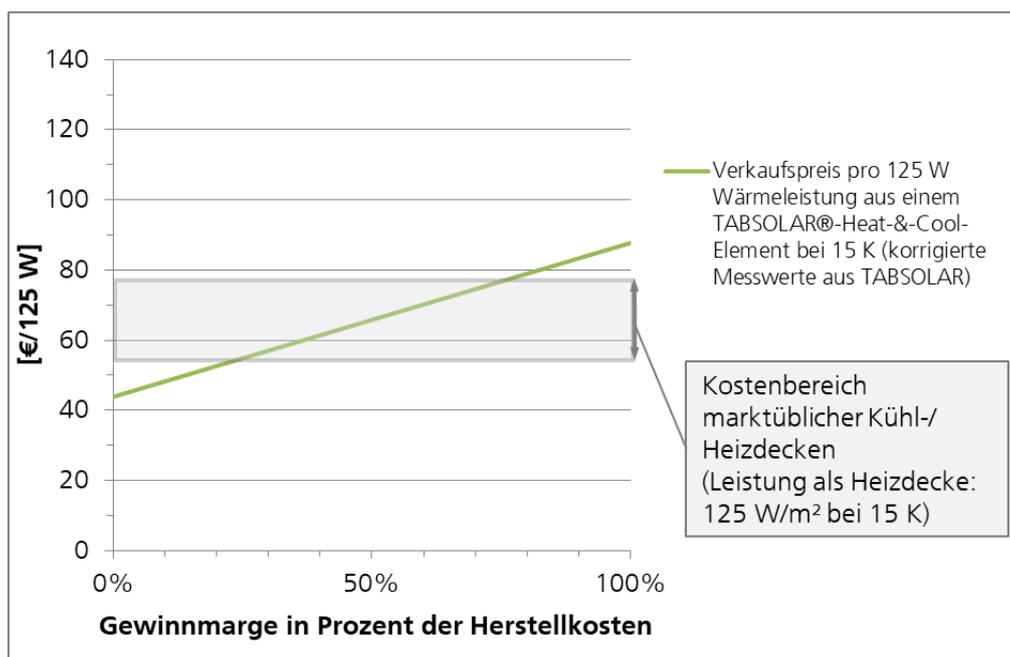


Abbildung 181: Mittlere Kostenschätzung für TABSOLAR® Heat & Cool. Der grau hinterlegte Bereich zeigt den Kostenrahmen für geschlossene Kühldecken mit Kupfermäander. Vertriebskosten, Kosten für Unterkonstruktion und für die Installation sind nicht berücksichtigt, weder für TABSOLAR® Heat & Cool noch für die Referenz-Kühldecken. Die Kosten beziehen sich auf 125 Watt Wärmeleistung.

FAZIT: Die Kalkulationen zeigen, dass TABSOLAR®-Elemente sowohl als architektonisch ansprechende Fassade zur Energiegewinnung als auch als Flächenheiz- bzw. -kühlelement voraussichtlich attraktive Preise erzielen können. Eine hinsichtlich architektonischer Gestaltung mit TABSOLAR®-Elementen vergleichbare Fassade, beispielsweise Eternit, kostet ca. 200-350 EUR/m² (je nach Muster, Farbe, Größen und Befestigungssystem). Bei den Energiefassaden stellen die verringerten Vertriebskosten durch Umgehung eines dreistufigen Vertriebswegs einen wesentlichen Baustein für attraktive Preise dar. Bezüglich der Gesamtsysteme stellen Eisspeicher nach heutigem Stand der Technik noch einen hohen Kostenfaktor dar, der sich wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit auswirken kann. Wird der Kollektor wegen geringer Dampfdiffusion nur mit Wasser und nur bei Temperaturen oberhalb von 0 °C betrieben, werden große Eisspeicher benötigt (in den vorgestellten Simulationen 1,14 m³ Eisspeicher pro MWh Heizwärmebedarf). Kann der Kollektor mit Wärmeträgerfluiden mit Frostschutz und somit auch bei Temperaturen unter 0 °C über die Wintermonate betrieben werden, sind nur kleine oder gar keine Eisspeicher notwendig. Hier kommen gegebenenfalls etwas erhöhter Wartungsaufwand und leicht erhöhte Komponentenkosten aufgrund des Wärmeträgerfluids hinzu. Insgesamt kommt daher kosten-

günstigen Eisspeicherkonzepten oder Konzepten, die vollständig auf Eisspeicher verzichten können, eine hohe Bedeutung zu.

2.5.5 Praktische Umsetzung

Im Zuge der Projektbearbeitung wurden von Priedemann Facade-Lab unterschiedliche Anwendungsfälle in Bezug auf Integration in die Gebäudehülle – auch Dach, Auskragungen etc. betrachtend – und Gebäudetypologien untersucht und bewertet, um einen Überblick über zukünftige Nutzungsszenarien zu erhalten und die TABSOLAR®-Technologie entsprechend weiterzuentwickeln. Abbildung 182 zeigt den Entwurf eines Einfamilienhauses mit TABSOLAR®-Elementen.

Auf Basis dieser Arbeiten wurden die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten der TABSOLAR®-Lösung in der Gebäudehülle aufgezeigt. So kann TABSOLAR® in Zukunft nicht nur als Fassadenbekleidung, sondern auch im Dachbereich, der in moderner Architektur immer stärker mit der Fassade verschwimmt, als Balustrade oder sogar als Bodenbelag von beispielsweise Terrassen genutzt werden. Anhand dieser konzeptionellen Untersuchungen wurden auch Bauteilanschlüsse im Schnittstellenbereich Fassade und TABSOLAR® entwickelt (vgl. 2.6), die wiederum wichtigen Input für die Optimierung und Fassadentauglichkeit des TABSOLAR®-Elements lieferten.

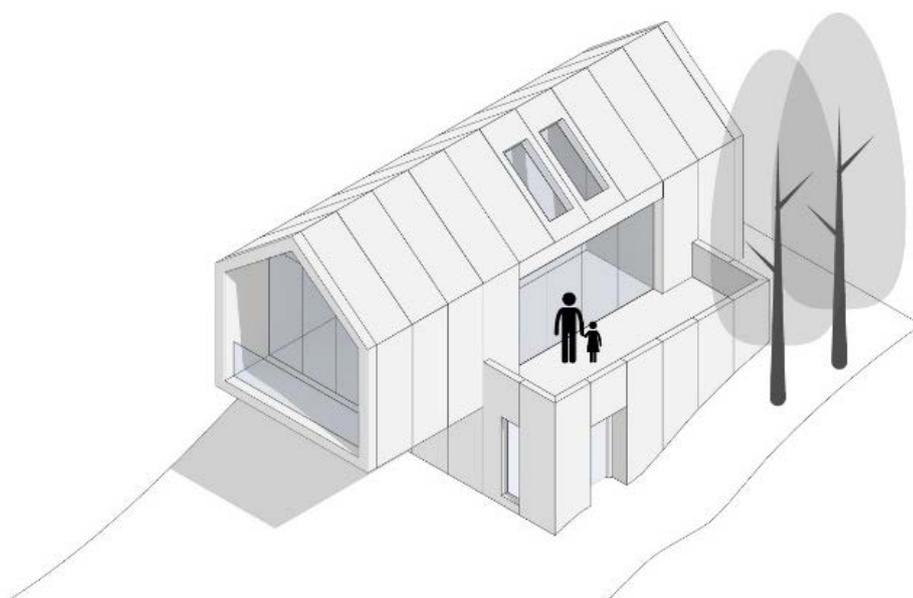


Abbildung 182: Entwurf »Einfamilienhaus« aus TABSOLAR®-Elementen

Zur detaillierten Betrachtung des TABSOLAR®-Systems in relevanten Gebäudetypologien wie dem Mehrfamilienhausbau wurde ein repräsentatives Bauvorhaben ausgesucht, welches dem Fraunhofer ISE für weitere Berechnungen und Simulationen dient (Abbildung 183). Entsprechende Projektunterlagen werden fortlaufend ausgetauscht.



Abbildung 183: LUX Berlin (Quelle: axthelm+rolvien)

Tabelle 30: Mögliche TABSOLAR®-Anwendungen

	Wandaufbau						Dach			Decke/Boden		
	Auf der Baustelle		Vorgefertigt			Dachabschluss	Sonnenschutz		Balkon	Dachterrasse oder Freibereich	Atriumboden; Innenraum	
	VHF mit UHPC-Bekleidung	WDVS mit UHPC-Abschluss	Doppelwand	Sandwich Wand	Vorhangfassade (opaker Bereich)		Auskragung	Lamellen				
Produktfamilien												
"Premium"	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
"Economy"	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
"Design"	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Gebäudetypologie												
Sanierung	•											•
Einfamilien-/Reihenhaus	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Mehrfamilienhaus	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Bürogebäude	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Hotel	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Einkaufszentrum	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Supermarkt	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Schule	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Hochschule	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Bücherei/Museum	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Industriebau	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Krankenhaus	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Restaurant	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Sporthalle	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Veranstaltungshalle	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

2.6 Arbeitspaket 6: Konzeptionierung, Entwurf, Bau und Inbetriebnahme eines Demonstrationsgebäudes

2.6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurden Konzepte für ein Demonstrationsgebäude entwickelt. Auf Grund höherer Komplexität des Projekts in anderen Bereichen wurde das zunächst sehr ambitionierte Vorhaben eines freistehenden Demonstrationsgebäudes über einen iterativen Prozess optimiert: von einem modularen Bau als Besprechungsraum zu einem ausgebauten LKW-Auflieger über einen temporären Kleinstbau hin zu einem elementierten Demonstrationsraum, der die unterschiedlichen TABSOLAR®-Produktfamilien widerspiegelt, leicht aufzubauen und zu transportieren ist und darüber hinaus für die Anwendung im Innen- als auch Außenraum geeignet ist.

Die Entwicklung dieser unterschiedlichen Konzepte lieferte wichtige Erkenntnisse für die Optimierung von Fassadenanwendungen der TABSOLAR®-Technologie und dadurch auch Rückschlüsse auf die notwendige Ausgestaltung des TABSOLAR®-Elements. Als Ergebnis dieses Prozesses können auch die Messeexponate auf der BAU 2019 gesehen werden, an denen Grundsätze des Demonstrationsgebäudes umgesetzt wurden.

Anders als ursprünglich geplant konnte in der Projektlaufzeit kein Demonstrationsgebäude realisiert werden.

Zur Überführung der Ergebnisse in eine konkrete gebaute Anwendung wurde bereits nach Erarbeitung erster Ansätze zu Fassadenintegration, Skalierung und Ausgestaltung der Produktfamilien von Priedemann Facade-Lab mit der Erarbeitung von Konzepten zu einem Demonstrationsgebäude begonnen (Abbildung 184). Dies sollte neben dem repräsentativen Charakter vor allem dazu dienen, die erarbeiteten Lösungsansätze anhand einer solchen Anwendung/Case Study zu prüfen und weiterzuentwickeln. Auf Grund höherer Komplexität des Projekts in anderen Bereichen wurde das zunächst sehr ambitionierte Vorhaben eines freistehenden Demonstrationsgebäudes über einen iterativen Prozess optimiert: von einem modularen Bau als Besprechungsraum (Abbildung 185) zu einem ausgebauten LKW-Auflieger (Abbildung 186 und Abbildung 187) über einen temporären Kleinstbau (Abbildung 188) hin zu einem elementierten Demonstrationsraum, der die unterschiedlichen TABSOLAR®-Produktfamilien widerspiegelt, leicht aufzubauen und zu transportieren ist und darüber hinaus für die Anwendung im Innen- als auch Außenraum geeignet ist (Abbildung 189).

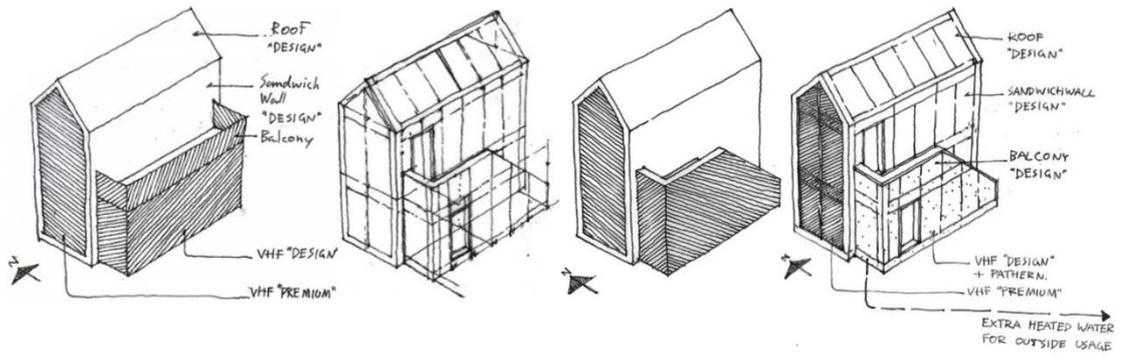


Abbildung 184: Erste Entwürfe für Demonstrationsgebäude

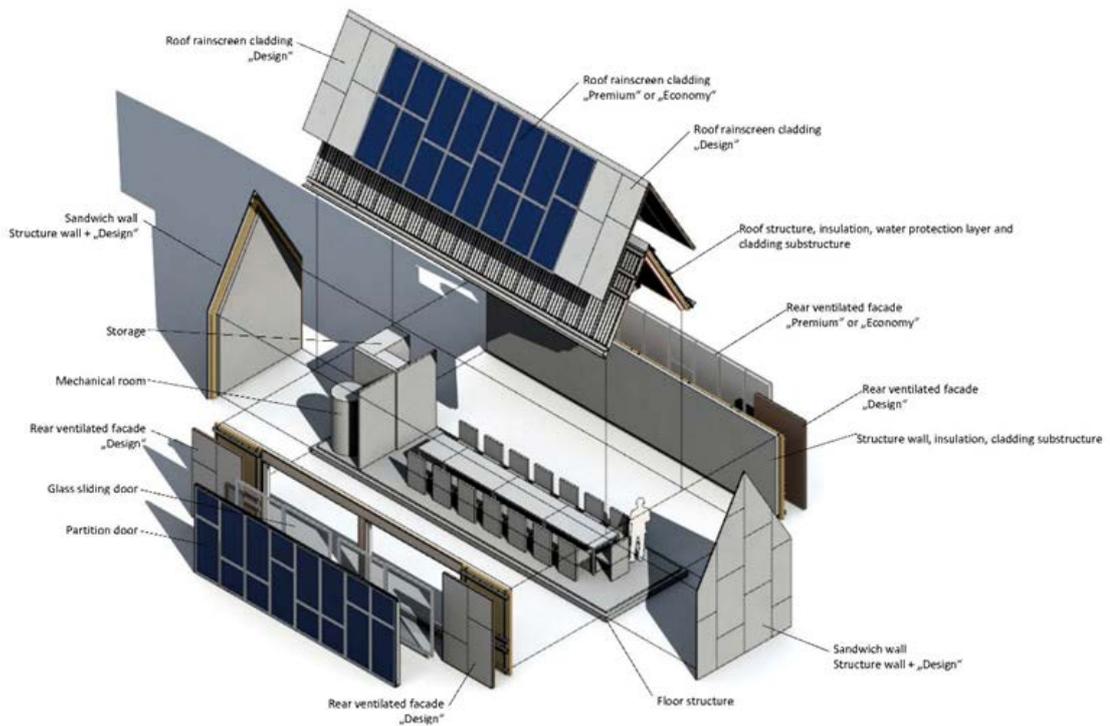


Abbildung 185: Explosionszeichnung eines Demonstrationsgebäudes



Abbildung 186: Schnittmodell eines mobilen Demonstrationsgebäudes (LKW-Auflieger) als Ausstellungsraum (oben) bzw. als Besprechungsraum (unten)

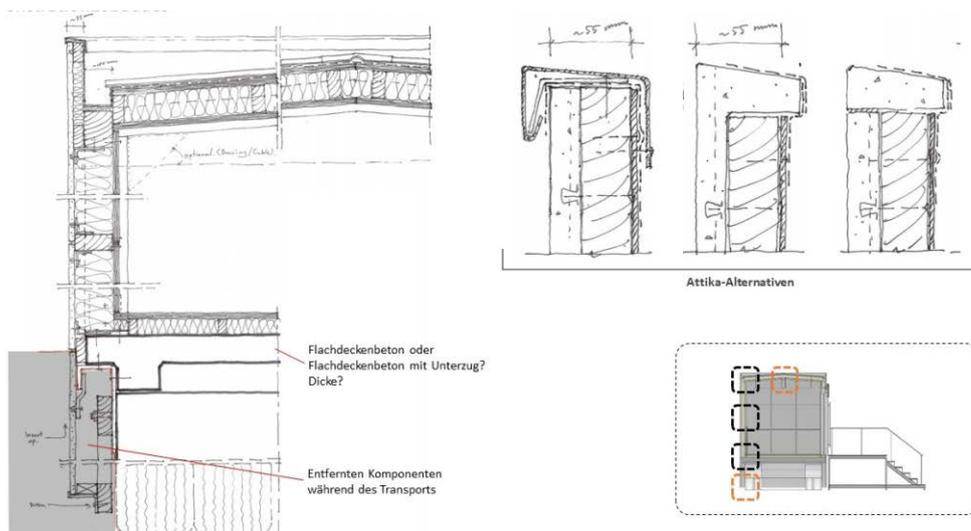


Abbildung 187: Auszug aus der Detailentwicklung des mobilen Demonstrationsgebäudes (LKW-Auflieger)

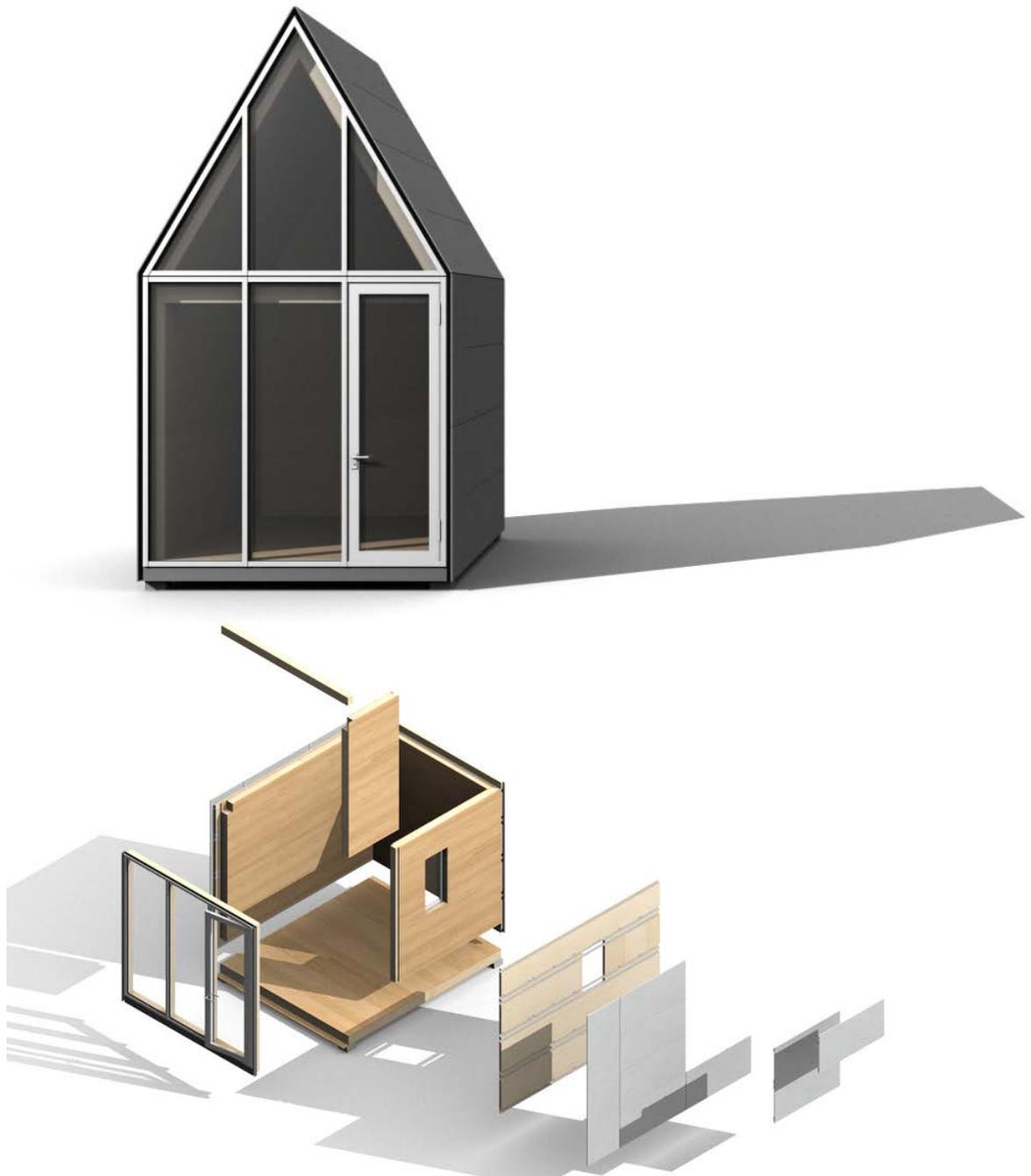


Abbildung 188: Modulares, transportables Demonstrationsgebäude; Entwurf (oben) und Explosionszeichnung (unten)

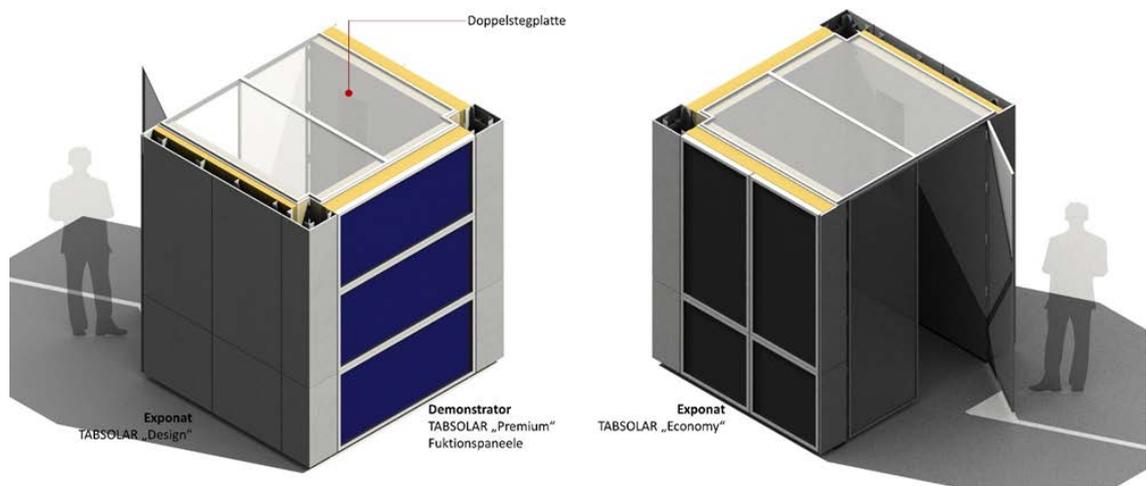


Abbildung 189: Aktualisierter Entwurf für modulares Demonstrationsgebäude

Die Entwicklung dieser unterschiedlichen Konzepte in verschiedenen Software-Tools, wie Rhino/Grasshopper, AutoCAD und Revit, lieferten dabei wichtige Erkenntnisse für die Optimierung von Fassadenanwendungen der TABSOLAR®-Technologie und dadurch auch Rückschlüsse auf die notwendige Ausgestaltung des TABSOLAR®-Elements. Als Ergebnis dieses Prozesses können auch die Messeexponate auf der BAU 2019 gesehen werden, an denen Grundsätze des Demonstrationsgebäudes umgesetzt wurden (Abbildung 190).

Anders als ursprünglich geplant konnte in der Projektlaufzeit kein Demonstrationsgebäude realisiert werden.

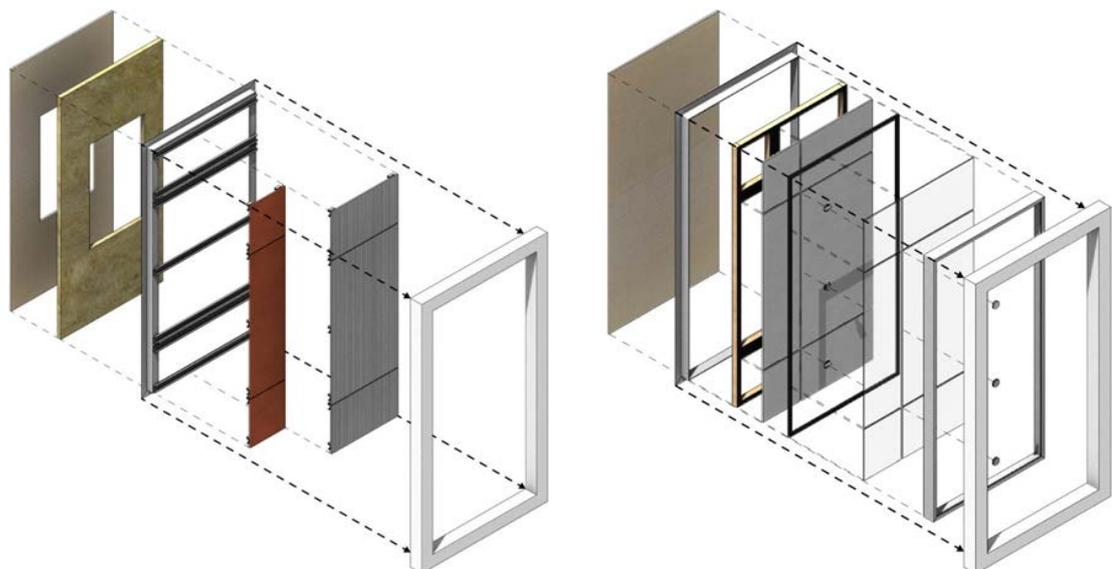


Abbildung 190: Muster inklusive Fassadenaufbau für die Messeexponate TABSOLAR® Design (links) und TABSOLAR® Premium (rechts)

2.7 Arbeitspaket 7: Mitarbeit am IEA-Task »Multifunctional Façades«

2.7.1 Zusammenfassung

Eine Teilnahme am IEA-Task »Multifunctional Façades« ermöglichte einen internationalen Austausch zu multifunktionalen Fassaden. Die Leitung des Subtasks B durch Christoph Maurer vom Fraunhofer ISE verlief während der Projektlaufzeit sehr gut, und die Beiträge aus der Wirtschaft waren sehr hilfreich.

Im Rahmen des Projekts war auch eine Teilnahme am IEA-Task »Multifunctional Façades« (<http://task56.iea-shc.org/>) möglich. Christoph Maurer vertrat bei den Treffen das Fraunhofer ISE und damit auch das gesamte Konsortium. Innerhalb des Task leitet er den Subtask B (Performance characterisation of solar envelope elements).

Er nahm an Treffen in Dublin (2./3.3.17), Eindhoven (21./22.9.17) und Montreal (20./21.9.18) teil, lediglich eine Teilnahme am Treffen in Innsbruck (6./7.3.18) musste er krankheitsbedingt absagen. Im Rahmen der Zwischenberichte informierte er das Konsortium über den aktuellen Stand.

Die Leitung des Subtasks B verlief während der Projektlaufzeit sehr gut, und die Beiträge aus der Wirtschaft waren sehr hilfreich, besonders für die Aktivität »Strategie«. Ein Review verfügbarer Simulationsmodelle soll dazu beitragen, dass die Erstellung von Simulationsmodellen für innovative Komponenten in Zukunft preiswerter wird, weil man leichter auf Bestehendem aufbauen kann. Zudem werden ausgewählte Normen daraufhin untersucht, ob sie sich problemlos auf solare Gebäudehüllen anwenden lassen oder Unklarheiten bestehen, die über Zulassungs- und Förderschwierigkeiten den kommerziellen Erfolg von Innovationen bedrohen. Neben Strategien zur Marktdurchdringung wurden auch Messungen für solare Gebäudehüllen diskutiert und die Frage, ob die bestehenden Normen dafür ausreichen. Bezüglich der Vergleichbarkeit von solaren Gebäudehüllen untereinander und mit konventionellen Gebäuden schlug Christoph Maurer vor, im Internet eine offene Datenbank einzurichten mit Referenzfällen, zu denen jeder detaillierte Varianten hochladen kann, so dass sich der Vergleich reproduzieren lässt. Jeder sollte die Datenbank nach seinen eigenen Kriterien durchsuchen können, um geeignete Gebäudehüllen zu finden. Zu den Nutzungsregeln sollte gehören, dass Firmen Nutzer entschädigen müssen, wenn die von ihnen hochgeladenen Simulationsergebnisse deutlich besser sind als die realen Ergebnisse ihrer Produkte.

2.8 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat.

2.9 Notwendigkeit der Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten dienten dem ursprünglich geplanten Zweck, durchströmbare Bauelemente auch Ultrahochleistungsbeton herzustellen, sie zu beschichten und Hydraulikanschlüsse zu entwickeln. Die Ausgaben waren notwendig, um die entsprechende Infrastruktur aufzubauen und Versuche durchzuführen (z. B. Herstellung von Werkzeugen, Materialkosten für UHPC-Entwicklung). Auch die Kosten für Tagungen, Messen, Arbeits- und Projekttreffen standen in angemessenem Verhältnis zu den erreichten Ergebnissen.

2.10 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Konsortium ist sehr daran interessiert, das TABSOLAR®-Konzept auf Basis der erreichten Ergebnisse bis zur Marktreife weiterzuentwickeln. Die Beantragung eines Folgeprojekts TABSOLAR III mit den bisherigen und mehreren neuen Partnern sowie weiteren Themen wie Softwareentwicklung und thermisch aktive Bauteilsysteme unterstreicht dies. Unter der Voraussetzung, dass der Fertigungsprozess derart entwickelt werden kann, dass reproduzierbar durchströmbare TABSOLAR®-Elemente in der geforderten Qualität hergestellt werden können, sehen die Konsortialpartner ein großes Marktpotenzial.

Um eine mögliche Kommerzialisierung vorzubereiten, nahmen – stellvertretend für das gesamte Konsortium – Michael Hermann, Lotta Koch und Paolo Di Lauro vom Fraunhofer ISE sowie Paul-Rouven Denz von Priedemann Facade-Lab im Jahr 2018 am Fraunhofer-Venture-Programm »FDays®« (Fraunhofer Days) teil. Bei dem Programm ging es im Wesentlichen darum, Fraunhofer-Technologie durch Ausgründungen oder Lizenzierung zu kommerzialisieren. Bei TABSOLAR® würde dies sinnvollerweise mit dem gesamten Konsortium z. B. in Form eines Joint Venture erfolgen. Über zwölf Wochen (Januar bis April 2018) wurden die teilnehmenden Teams insbesondere während der zehn Präsenztage ge-coacht. Dabei wurden Aspekte zum Team wie zum Geschäftsmodell einschließlich Kundenidentifikation, Nutzenversprechen, IP, Investment Management etc. berücksichtigt. Für die FDays® stand ein eigenes Projektbudget der Fraunhofer-Gesellschaft zur Verfügung. Durch die Teilnahme konnten für das Konsortium wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf mögliche Geschäftsmodelle und die Abbildung der gesamten Wertschöpfungskette von der Vorplanung/Konzeptionierung über Planung, Fertigung und Montage/Installation bis zum Betrieb unter Berücksichtigung der beteiligten Gewerke gewonnen werden. Diese Erkenntnisse flossen in die Planung der Arbeitspakete des Folgeprojekts TABSOLAR III ein.

Um das TABSOLAR®-Konzept bezüglich einer möglichen späteren Vermarktung zu stärken, wurde die Bezeichnung »TABSOLAR« als Wortmarke in das Markenregister eingetragen, weshalb nun im Außenraum die Bezeichnung »TABSOLAR®« verwendet wird.

Das dem Membran-Vakuumtiefziehverfahren zugrundeliegende Patent lief im Jahr 2019 nach einer Laufzeit von 20 Jahren ab. Das Patent zum FracTherm®-Verfahren, das ebenfalls zum Einsatz kommt, existiert jedoch noch. Es ist angedacht, zu den geplanten Weiterentwicklungen, die in TABSOLAR III erfolgen sollen, gegebenenfalls neue Schutzrechte anzumelden.

2.11 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Dem Konsortium sind keine relevanten Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die das TABSOLAR®-Konzept infrage stellen würden, jedoch gibt es Veröffentlichungen, die insbesondere im Hinblick auf TABSOLAR®-Systemkonzepte hilfreich sind und bei zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden sollen (z. B. zu Drainback-Konzepten, Eisspeichern, Wärmepumpensystemen, Betonkernaktivierung, ...).

2.12 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden wie geplant weitreichend durch die Projektpartner auf Veranstaltungen, Plattformen etc. präsentiert und diskutiert und in der Fachpresse aufgegriffen. Tabelle 31 zeigt Aktivitäten und Veröffentlichungen aus TABSOLAR II.

Tabelle 31: Übersicht über Aktivitäten und Veröffentlichungen in TABSOLAR II

Titel	Aktivität	Ort	Jahr
DGNB Immobilienbeirat	Fachvortrag	Frankfurt	11/2019
FACADES2019	Konferenzbeitrag	Lissabon	11/2019
InnoX 2019	Konferenzbeitrag	Wildau	09/2019
Fassade	Beitrag in Fachzeitschrift		03/2019
Nachhaltige Technologien	Beitrag in Fachzeitschrift		02/2019
FACADE	Kundenvortrag	Holland	02/2019
BAU 2019	Messeexponat	München	01/2019
Energieaktive Fassaden	Konferenzbeitrag	Wien	12/2018
3rd Innovative Glazing Summit	Konferenzbeitrag	Wien	11/2018
Workshop Multifunktionale Fassaden	Konferenzbeitrag	Berlin	11/2018
Advanced Building Skins	Konferenzbeitrag	Bern	10/2018
Futuras in Res	Konferenzexponat	Berlin	07/2018
Fassaden-Symposium Wien	Fachvortrag	Wien	06/2018
Universität Lübeck	Fachvortrag	Lübeck	06/2018
Symposium Solarthermie – Technik für die Wärmewende	Konferenzbeitrag	Bad Staffelstein	06/2018
CCBAU	Fachvortrag	Chemnitz	02/2018
Fassadentage 2017	Konferenzbeitrag	Würzburg	11/2017
Forum Zukunft Energie	Konferenzbeitrag	Stuttgart	10/2017
Betontage	Konferenzbeitrag	Neu-Ulm	02/2017
BAU 2017	Messeexponat	München	01/2017
Fassadentechnik	Beitrag in Fachzeitschrift		01/2017
Material Xperience	Fachvortrag	Utrecht	04/2017
Deutsches Architektenblatt	Beitrag in Fachzeitschrift		06/2017
Förderpraxis	Beitrag in Fachzeitschrift		07/2017
Xia	Beitrag in Fachzeitschrift		07-09/2017
New Energy Forum	Konferenzbeitrag	Tsingtao	11/2016
Forster Architekten-Seminar	Konferenzbeitrag	Stuttgart	10/2016
Bautechnik	Beitrag in Fachzeitschrift		01/2016
www.linkedin.com	Online-Plattform für Firmenkontakte (Posts)		Fortlaufend
www.researchgate.net	Online-Plattform zur Veröffentlichung wissenschaftlicher Papers		Fortlaufend
www.priedemann.net	Firmeneigene Website		Fortlaufend
www.tabsolar.de	Projektwebsite		Fortlaufend
Building Integrated Solar Envelope Systems for HVAC and lighting	IEA Task 56		Fortlaufend
Geplante Veröffentlichungen			
<i>Betontage</i>	<i>Konferenzbeitrag</i>	<i>Neu-Ulm</i>	<i>02/2020</i>
<i>Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme</i>	<i>Konferenzbeitrag</i>	<i>Bad Staffelstein</i>	<i>05/2020</i>

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt TABSOLAR II baute auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts TABSOLAR auf, in dem grundlegende Untersuchungen zur Herstellung durchströmbarer Bauelemente aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) durchgeführt worden waren.

Zu Beginn von TABSOLAR II wurden Fassadensysteme bzw. Kollektor- und TABS-Lösungen analysiert, um Konstruktionen, Preise, architektonisches Potenzial und Wirkungsgrad zu vergleichen. Auf Basis dieser Marktanalyse wurden einzelnen Entwicklungspfade im Hinblick auf Fassadensysteme in Kombination mit den Produktfamilien erarbeitet und im weiteren Projektverlauf in einem iterativen Prozess ausgearbeitet. Es wurden Überprüfungen und Recherchen zu Wohn- und Industriegebäuden durchgeführt und Vor- und Nachteile kleiner Elementgrößen analysiert. Im Projektkonsortium einigte man sich aufgrund der Analyse und Expertise der Partner auf drei Entwicklungspfade. Die Arbeiten konzentrierten sich schließlich auf das Konzept der vorgehängten hinterlüftete Fassade (VHF), weil sie eine Option für alle Produktfamilien darstellt und sowohl für den Neubau als auch für die Sanierung geeignet ist. Für die festgelegten drei TABSOLAR®-Produktfamilien wurden konkrete Beschichtungskonzepte vorgeschlagen.

Die Oberflächen von spektralselektiv beschichteten Betonproben wurden mit Hilfe eines Stereomikroskops sowie mittels REM/EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) im Hinblick auf die Kontaktzonen zwischen spektralselektiver Schicht und Betonoberfläche und deren chemische Elemente untersucht. Für die spektralselektive Variante der Produktfamilie TABSOLAR® *Design* konnte ein Schichtsystem entwickelt werden, das beschleunigte Alterungstests unbeschadet übersteht. Es konnte eine Schicht identifiziert werden, mit der eine hohe Oberflächenqualität und damit geringer Emissionsgrad der spektralselektiven Absorberschicht erzielt werden konnte. Für die Messe BAU 2017 wurden kleine Handmuster und für die Messe BAU 2019 große TABSOLAR®-Elemente und UHPC-Platten ohne Kanäle für das Exponat der Produktfamilie TABSOLAR® *Premium* spektralselektiv beschichtet.

Um eine Dampfdiffusion des Wärmeträgermediums durch die Kanalstrukturen zu vermeiden, wurden mehrere filmbildende Stoffe zur Auskleidung der Kanäle untersucht. Aus derzeitiger Sicht scheint die Verwendung von Gießsilikonen anwendbar zu sein. Als Alternative zur Auskleidung der Kanäle wird eine Drainback-Solaranlage mit reinem Wasser als Wärmeträgermedium vorgeschlagen. Für die Hydraulikanschlüsse wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und geprüft. Dazu wurden Muster mittels 3D-Druck aus unterschiedlichen Polymermaterialien hergestellt. Die Hydraulikanschlüsse nach dem schließlich bevorzugten Konzept weisen eine konische Form mit einer Manteldichtung auf und werden

über eine Verschraubung mittels Gewindestiften, die über Siebdübel mit dem UHPC verbunden sind, axial verspannt. Es wurden verschiedene strukturmechanische Untersuchungen durchgeführt. So wurde die Biegezugfestigkeit der Verbindungsflächen des TABSOLAR®-Elements experimentell ermittelt, und die maximale Druckbeständigkeit von Sammelkanälen wurde durch FEM-Analysen und Zugversuche bestimmt. Darüber hinaus wurden Aspekte der Materialverdrängung beim Fügeprozess betrachtet. Durch Thermochocktests sollte herausgefunden werden, wie TABSOLAR®-Elemente auf plötzliche Temperaturwechsel reagieren. Für die Befestigung von TABSOLAR®-Elementen als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) sind übliche Agraffen vorgesehen. Es wurde ein Konzept für die Hydraulikverbindung von TABSOLAR®-Elementen beim Einhängen in die VHF-Unterkonstruktion vorgeschlagen.

Für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen wurde eine Wendeeinheit auf Basis einer handelsüblichen Hebebühne entwickelt und hergestellt, welche die Basis für zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Rezepturen, Verfahrensparametern sowie Vorrichtungen war. Zur Herstellung großer TABSOLAR®-Elemente mit Hilfe des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens wurden geeignete Werkzeuge konstruiert und hergestellt. Dabei wurden auch die Schnittstellen für die Hydraulikanschlüsse berücksichtigt. Eine wesentliche Basis für die Fertigung stellte die Entwicklung und Herstellung geeigneter UHPC-Mischungen dar. In zahlreichen Schritten wurden die Frischbetoneigenschaften, z. B. die Fließgrenze, passend für den Membran-Vakuumtiefziehprozess eingestellt. Zunächst konnten erfolgreich mehrere ca. 1 m² große TABSOLAR®-Elemente hergestellt werden. Zur Überprüfung der Kanalquerschnitte wurden sie aufgetrennt. Im weiteren Projektverlauf traten jedoch zunehmend Schwierigkeiten bei der Fertigung auf – entweder entstanden verschlossene Kanäle oder mangelhafte Verbindungen der beiden Bauteilhälften, so dass schließlich kein TABSOLAR®-Element für weitere Vermessungen hergestellt werden konnte. Es wurde erkannt, dass die Einfüllmenge an Frischbeton in die Schalung nur bedingt händisch erfolgen kann, da dieses zu hohen Einflüssen und Schwankungen unterliegt. Daher wird zukünftig eine teilautomatisierte Herstellung von TABSOLAR®-Elementen empfohlen, um deren Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Um dennoch durchströmbare Kanalstrukturen zu erhalten, wurden Versuche zu zwei Ansätzen durchgeführt, die das bestehende Membran-Vakuumtiefziehverfahren erweitern. Mit einem konnte bereits ein großes durchströmbares TABSOLAR®-Element hergestellt werden, mit dem anderen ein kleines Muster im Labormaßstab. Im Zuge der Erarbeitung von Lösungen zur Fassadenintegration von TABSOLAR®-Elementen wurden mit aktuellem Fokus auf das Fassadensystem der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten unter Betrachtung der TABSOLAR®-Produktfamilien entwickelt. Für die Verglasung der Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Economy* wurden verschiedene

Konzepte vorgeschlagen. Während des gesamten Vorhabens wurden unterschiedliche Muster angefertigt und so auch auf Messen (BAU 2017, BAU 2019) und im Nachgang im Showroom des Priedemann Facade-Lab ausgestellt. Auf der Messe BAU 2017 wurden kleine Muster der drei Produktfamilien TABSOLAR® *Premium*, TABSOLAR® *Economy* und TABSOLAR® *Design* präsentiert, auf der Messe BAU 2019 waren große Exponate der Produktfamilien TABSOLAR® *Premium* und TABSOLAR® *Design* sowie ein Handmuster zu sehen. Die Resonanz der Messebesucher war sehr gut.

Für die Abschätzung der Energieströme und Temperaturen, insbesondere der Stagnationstemperaturen, von TABSOLAR®-Elementen wurden thermische Simulationen durchgeführt. Des Weiteren wurden die voraussichtlichen Bruttokollektorerträge für konstante Kollektormitteltemperaturen berechnet. Ein besonderer Fokus lag auf Simulationen für Systeme mit TABSOLAR®-*Design*-Elementen in Kombination mit Wärmepumpe und Eisspeicher. Am Beispiel einer Sanierung eines Mehrfamilienhauses zeigte sich, dass es voraussichtlich möglich ist, eine Außenlufteinheit durch TABSOLAR®-*Design*-Elemente und Eisspeicher als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu ersetzen. Insbesondere vor dem Hintergrund des Einsatzes von Beton kommt Lebenszyklusbetrachtungen von TABSOLAR®-Elementen eine wesentliche Bedeutung zu. So wurde ein TABSOLAR®-*Design*-System mit Eisspeicher und Wärmepumpe mit zwei Vergleichsszenarien auf Basis von Luftwärmepumpe und Wärmedämmverbundsystem (WDVS) bzw. UHPC-Fassade ohne thermische Funktionalität hinsichtlich Primärenergie und Treibhauspotenzial verglichen. Alle Komponenten des Heizungssystems, die sich in den verschiedenen Pfaden unterscheiden, und die jeweilige Südfassade wurden mit Hilfe des Programms Umberto® und der Datenbank Ecoinvent V3.5 ökologisch inventarisiert. Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend, weil sich voraussichtlich durch eine architektonisch attraktive Fassade eine Außenlufteinheit ersetzen lässt, was ästhetisch und akustisch vorteilhaft ist, und sich außerdem die Bilanz bezüglich Primärenergie und Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 25 Jahren nach aktuellem Stand für TABSOLAR® vorteilhaft darstellt. Erste Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass TABSOLAR®-Elemente sowohl als architektonisch ansprechende Fassade zur Energiegewinnung als auch als Flächenheiz- bzw. -kühlelement voraussichtlich attraktive Preise erzielen können. Bezüglich der Gesamtsysteme stellen Eisspeicher nach heutigem Stand der Technik noch einen hohen Kostenfaktor dar, der sich wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Daher kommt kostengünstigen Eisspeicherkonzepten oder Konzepten, die vollständig auf Eisspeicher verzichten können, eine hohe Bedeutung zu. Es wurden unterschiedliche Anwendungsfälle in Bezug auf Integration in die Gebäudehülle und Gebäudetypologien untersucht und bewertet, um einen Überblick über zukünftige Nutzungsszenarien zu erhalten und die TABSOLAR®-Technologie entsprechend weiterzuentwickeln.

Im Rahmen des Projekts wurden Konzepte für ein Demonstrationsgebäude entwickelt. Auf Grund höherer Komplexität des Projekts in anderen Bereichen wurde das zunächst sehr ambitionierte Vorhaben eines freistehenden Demonstrationsgebäudes über einen iterativen Prozess optimiert: von einem modularen Bau als Besprechungsraum zu einem ausgebauten LKW-Auflieger über einen temporären Kleinstbau hin zu einem elementierten Demonstrationsraum, der die unterschiedlichen TABSOLAR®-Produktfamilien widerspiegelt, leicht aufzubauen und zu transportieren ist und darüber hinaus für die Anwendung im Innen- als auch Außenraum geeignet ist. Die Entwicklung dieser unterschiedlichen Konzepte lieferte wichtige Erkenntnisse für die Optimierung von Fassadenanwendungen der TABSOLAR®-Technologie und dadurch auch Rückschlüsse auf die notwendige Ausgestaltung des TABSOLAR®-Elements. Als Ergebnis dieses Prozesses können auch die Messeexponate auf der BAU 2019 gesehen werden, an denen Grundsätze des Demonstrationsgebäudes umgesetzt wurden. Anders als ursprünglich geplant konnte in der Projektlaufzeit kein Demonstrationsgebäude realisiert werden.

Eine Teilnahme am IEA-Task »Multifunctional Façades« ermöglichte einen internationalen Austausch zu multifunktionalen Fassaden. Die Leitung des Subtasks B durch Christoph Maurer vom Fraunhofer ISE verlief während der Projektlaufzeit sehr gut, und die Beiträge aus der Wirtschaft waren sehr hilfreich.

Als Gesamtfazit kann festgehalten werden, dass in TABSOLAR II wesentliche weitere Schritte im Hinblick auf eine Produktentwicklung gegangen werden konnten. Dies betrifft sowohl Aspekte der Technologieentwicklung als auch der Einschätzung des Marktes. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der manuellen Produktion kam es jedoch zu Verzögerungen im Projektverlauf und gegenüber der Planung erhöhtem Ressourcenbedarf für die Fertigung, und nicht alle Ziele konnten erreicht werden. Da sich die händische Herstellung von TABSOLAR®-Elementen als nicht zuverlässig im Hinblick auf eine Reproduzierbarkeit erwies, wird eine teilautomatisierte Fertigung empfohlen, bei der die Prozessparameter deutlich genauer eingestellt und geregelt werden können. Darüber hinaus sollte angestrebt werden, das bisherige Membran-Vakuumtiefziehverfahren weiterzuentwickeln, um seine bisherigen Schwächen zu eliminieren. Diese Empfehlungen sollen im geplanten Folgeprojekt TABSOLAR III umgesetzt werden.

4 Danksagung

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

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick Entwicklungspfade	11
Abbildung 2: Lasten und Pflichten WDVS.....	11
Abbildung 3: Lasten und Pflichten WDVS.....	12
Abbildung 4: Lasten und Pflichten Sandwichwand	12
Abbildung 5: Probe aus TABSOLAR I bei 20facher (links) bzw. 50facher (rechts) Vergrößerung, untersucht mittels Stereomikroskop.....	17
Abbildung 6: Bruchfläche einer beschichteten Betonprobe aus TABSOLAR I, untersucht mittels REM, Bildhöhe 101 µm (links); Detail, Übergang UHPC/spektralselektive Beschichtung, Bildhöhe 10,1 µm (rechts).....	17
Abbildung 7: Partielle Untersuchung der Probe im Übergangsbereich UHPC/spektralselektive Schicht mittels EDX (links) und detektierte, oberflächennahe Elemente (rechts).....	18
Abbildung 8: Foto der glatten Betonproben ohne zusätzlichen Lack; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen.....	19
Abbildung 9: Foto der glatten Betonproben mit Lack 1; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen	20
Abbildung 10: Foto der glatten Betonproben mit Lack 2; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen	20
Abbildung 11: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) ohne zusätzliche Lackschicht nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	21
Abbildung 12: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) ohne zusätzliche Lackschicht nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C	21
Abbildung 13: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 1 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	22

Abbildung 14: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 1 nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C.....	22
Abbildung 15: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 2 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	23
Abbildung 16: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (glatt) mit Lack 2 nach 100 h und 500 h Alterung im Ofen bei 160 °C.....	23
Abbildung 17: Foto der rauen Betonproben mit Lack 1; links: nach 12 Tagen Klimaschrank (85 °C, 85 % r. F.), rechts: nach 500 h bei 160 °C im Ofen	24
Abbildung 18: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (rau) mit Lack 1 nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	24
Abbildung 19: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten UHPC (rau) mit Lack 2 nach 100 h Alterung im Ofen bei 160 °C	25
Abbildung 20: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten Glases ohne zusätzliche Lackschicht nach bis zu 12 Tagen Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	26
Abbildung 21: Reflexionsspektren des spektralselektiv beschichteten Glases ohne zusätzliche Lackschicht nach 100 h Alterung im Ofen bei 160 °C.....	26
Abbildung 22: Foto von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte (links) und 500 h bei 160 °C im Ofen (rechts)	27
Abbildung 23: Reflexionsspektren von UHPC – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	29
Abbildung 24: Reflexionsspektren von UHPC– Absorber– Lack 2 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	29
Abbildung 25: Reflexionsspektren von UHPC – Absorber – Lack 3 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	30

Abbildung 26: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	31
Abbildung 27: Lichtmikroskopaufnahmen nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 50facher Vergrößerung: UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 (links) und UHPC – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 2 (rechts)	31
Abbildung 28: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte.....	32
Abbildung 29: Reflexionsspektren von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 500 h Alterung bei 160 °C im Ofen	33
Abbildung 30: Lichtmikroskopaufnahmen von UHPC – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 10facher (links) und 50facher Vergrößerung (rechts)	33
Abbildung 31: Proben der 4. Versuchsreihe nach 12 Tagen Klimaschranktest.	34
Abbildung 32: Reflexionsspektren von UHPC(G.tecz) – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	35
Abbildung 33: Reflexionsspektren von UHPC(Spürgin) – Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	36
Abbildung 34: Lichtmikroskopaufnahmen von Lack 1 – Absorber – 2 * Lack 1 nach 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte in 10facher (oben) und 50facher Vergrößerung (unten); links: G.tecz, rechts: Spürgin	36
Abbildung 35: Reflexionsspektren von UHPC(G.tecz) – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	38
Abbildung 36: Reflexionsspektren von UHPC(Spürgin) – Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 nach bis zu 288 h Alterung im Klimaschrank bei 85 °C/85 % rel. Feuchte	39

Abbildung 37: Mit unterschiedlichen Schalttafeln hergestellte, unbeschichtete Betonproben	41
Abbildung 38: Mit unterschiedlichen Schalttafeln hergestellte, beschichtete Betonproben	41
Abbildung 39: Untersuchung der UV-Beständigkeit des TABSOLAR®- <i>Design</i> -Absorbers: Reflexionsspektren vor bzw. nach UV-Test und Klimaschranktest sowie Foto des Absorbers (rechts: mit UV bestrahlte Seite)	42
Abbildung 40: TABSOLAR®- <i>Premium</i> -Absorber nach dem Trocknungsprozess im Ofen und nach spektralselektiver PVD-Beschichtung	43
Abbildung 41: REM-Aufnahmen von Wasserglasbeschichtungen; links: Oberfläche (Probe BV3, Beschichtung LI22 mod., Bildhöhe 506 µm); rechts: Querschnitt einer beschichteten Probe (Probe 1,7, Bildhöhe 255 µm).....	45
Abbildung 42: Verguss von Probekörpern mit Polyurethan (PU) und Silikon (links); Prüfschema, 3-Punkt-Biegezugversuch (rechts)	46
Abbildung 43: Proben mit unterschiedlicher Beschichtung und Nachbehandlung	47
Abbildung 44: Kanalstruktur ohne und mit Auskleidung der Oberfläche und Zwickelstellen	47
Abbildung 45: Auskleidung der Kanaloberfläche sowie Ausfüllen der Zwickelstellen	48
Abbildung 46: Überfüllung der Zwickelstellen – Verkleinerung des Querschnitts	48
Abbildung 47: Versuchskörper mit beispielhaften Hydraulikanschlüssen; links: Gesamtansicht, rechts: Schnitt.....	50
Abbildung 48: Hydraulikanschluss mit Rippenstruktur	50
Abbildung 49: Querschnitt eines Versuchselements auf Formplatte.....	51
Abbildung 50: Hydraulikanschlüsse eingelegt in frischen, tiefgezogenen UHPC (links) und fertiges Bauteil nach vollständigem Membran-Vakuumtiefziehprozess (rechts) auf Formplatte	51

Abbildung 51: Ansicht eines beispielhaften Hydraulikanschlusses (links: geschnitten, rechts: Komplettansicht)	52
Abbildung 52: Hydraulikanschlüsse mit unterschiedlichen Beschichtungen der Firma SmoothOn: Silikon (Smooth Sil 950, links), Polyurethan (PMC770, Mitte), Epoxidharz (Plasti Paste II, rechts).....	53
Abbildung 53: Schnittkanten von mit Silikon (links) bzw. Polyurethan (rechts) beschichteten Hydraulikanschlüssen	54
Abbildung 54: Tiefgezogene Kanalstrukturen unter Verwendung der Spürgin adaptierten Mischungsrezeptur	54
Abbildung 55: Tiefgezogene Membran mit einem eingelegten Hydraulikanschluss.....	55
Abbildung 56: Wenden der tiefgezogenen UHPC-Hälfte mit eingelegten Hydraulikanschlüssen (links), ausgeschaltete Sammelkanäle aus UHPC mit eingebetteten Hydraulikanschlüssen (rechts)	56
Abbildung 57: Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfungen an Sammelkanälen aus UHPC mit eingebetteten Hydraulikanschlüssen.....	56
Abbildung 58: Hydraulikanschlüsse aus vier unterschiedlichen 3D-Druck-Materialien für Druckbeständigkeitsprüfungen (links), erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfung (11 bar Berstdruck) an einem von vier Hydraulikanschlüssen (rechts)	57
Abbildung 59: Angepasste Formplatte für verbesserte Herstellung der UHPC-Sammelkanäle mit Hydraulikanschlüssen (links); betätigte und arretierte, federnde Taste, die während des Membran-Vakuumtiefziehverfahrens als bewegliche Schalung dient, um ein Wegfließen des UHPC an den Sammelkanalenden zu unterbinden (rechts).....	57
Abbildung 60: Eingelegter Hydraulikanschluss mit Kragen, der ein Wegfließen des UHPC verhindern soll (links); CAD-Modell der Sammelkanäle aus UHPC mit eingebetteten, angepassten Hydraulikanschlüssen (rechts)	58
Abbildung 61: Einlegeteil mit Entformschräge aus PTFE (links), Schnittdarstellung im kleinen Werkzeug (rechts)	59

Abbildung 62: Schnittdarstellung des Hydraulikanschlusses mit Silikonummantelung (links) bzw. mit zwei O-Ring-Nuten (rechts) im UHPC-Sammelkanal	59
Abbildung 63: UHPC-Sammelkanal, Hydraulikanschluss mit Silikonummantelung und Befestigung gegen Innendruck	59
Abbildung 64: Zwei UHPC-Würfel mit je zwei abgeformten Hydraulikanschlussformen (links), UHPC-Würfel mit eingeklebtem Hydraulikanschluss (rechts).....	60
Abbildung 65: Flexibler Hochtemperaturklebstoff Duralco 4538 (links), Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfung des 3D-gedruckten Hydraulikanschlusses (rechts).....	60
Abbildung 66: Mittlere UHPC-Sammelkanäle mit eingeklebten 3D-gedruckten Hydraulikanschlüssen	61
Abbildung 67: Erfolgreiche Druckbeständigkeitsprüfungen am mittleren Sammelkanal aufgrund von Lunkern.....	61
Abbildung 68: UHPC-Modul mit Hydraulikanschluss: Schnittdarstellung (links) und Draufsicht (rechts)	62
Abbildung 69: UHPC-Modul mit Hydraulikanschlüssen	62
Abbildung 70: Kleines Werkzeug mit Hydraulikanschluss-Einlegeteil, Siebdübel und Positionierplatte	63
Abbildung 71: Siebdübel mit Gewindestange: Zeichnung (links), händisch hergestellte Exemplare (rechts)	64
Abbildung 72: Herstellung Manteldichtung mit 2K-Silikon und Exsikkator.....	64
Abbildung 73: Aus einem wasserlöslichen Filament gedruckte Gießform (links), Gießform gefüllt mit 2K-Silikon (Mitte), hergestellte Manteldichtung nach Auflösung der Gießform im Wasserbad (rechts)	64
Abbildung 74: 3D-gedruckter Hydraulikanschluss aus Nylon mit Manteldichtung aus 2K-Silikon.....	65

Abbildung 75: Skizzen der zweischichtigen Proben (Schicht A und B) und des 3-Punkt-Biegeversuchs	65
Abbildung 76: Proben und 3-Punkt-Biegeversuch.....	66
Abbildung 77: Bruchspannungen	67
Abbildung 78: Bruchbilder der Proben. Der Bruch verläuft bei Probe 3 (links) entlang der Kontaktfläche, bei Probe 11 (rechts) im Beton	67
Abbildung 79: Sammelkanal 30 mm breit.....	68
Abbildung 80: Zugspannungsverteilungen (S1) und Maximalwerte der (Halb-) Modelle bei 1 bar Innendruck.....	68
Abbildung 81: Errechneter Berstdruck (bei 10 MPa Zugfestigkeit des UHPC) ..	68
Abbildung 82: Zeichnung der Platte mit unterschiedlichen Kanalquerschnitten (oben) und in ca. 20 mm breite Streifen geschnittene Proben	69
Abbildung 83: Lokale Schichtdicken	69
Abbildung 84: Zusammenhang zwischen maximaler Wandstärke und nominaler Kanalbreite	70
Abbildung 85: Spalt zwischen den Schichten (links) und längliche Zwickelform (rechts)	70
Abbildung 86: Zwickelformen	71
Abbildung 87: Halber Kanalquerschnitt (links) in der Zugprüfmaschine und Kraft-Weg-Diagramm (rechts).....	72
Abbildung 88: Oben: Bruchkräfte und Versagensorte (rote Linien), Mitte: gemessene Wandstärken, unten: gebrochene Proben	73
Abbildung 89: Spannungsplots der durchgeführten Zugversuche (links), unter Innendruck (mittig) und symmetrischer Halbmodelle (rechts) auf Basis der Probenfotos.....	74
Abbildung 90: Modell zur Materialverdrängung aufgrund der erforderlichen Durchdringung und daraus resultierender Querschnittsminderung der Kanäle	75

Abbildung 91: Modifikation des Tiefziehwerkzeuges in flächigen Bereichen zur Minimierung der Materialverdrängung	75
Abbildung 92: Vorrichtung zum Anpassung der Ebenheit der Formplatte.....	76
Abbildung 93: Durch Herunterkühlen der Oberfläche um 100 K (Thermoschock in Kanalinnenseite) bedingte Zugspannungen	77
Abbildung 94: Temperaturverteilung beim Abkühlen	77
Abbildung 95: UHPC-Probe mit Vorrichtung für Drei-Punkt-Biegeversuch	78
Abbildung 96: Rissbildung an den Oberflächen durch Thermoschock.....	79
Abbildung 97: Biegefestigkeiten von Referenz- und abgeschreckten Proben ..	80
Abbildung 98: Agraffe mit zwei Z-Profilen (links), Seitenansicht TABSOLAR®-Element mit überstehender Agraffe (rechts)	80
Abbildung 99: Schematische Darstellung; Agraffenpositionen für horizontale und vertikale TABSOLAR®-Elemente.....	81
Abbildung 100: Schematische Darstellung; links: horizontales Element, rechts: vertikales Element	81
Abbildung 101: Schematische Darstellung der Abmessungen am Rand eines TABSOLAR®-Elements	82
Abbildung 102: Schematische Darstellung; unten: fixiertes TABSOLAR®-Element; oben: einzuhängendes TABSOLAR®-Element.....	83
Abbildung 103: Schematische Darstellung; links: Buchsen-Positionen vor dem Einhängen des Moduls; rechts: zwei eingehängte und hydraulisch verbundene TABSOLAR®-Elemente	83
Abbildung 104: Schematische Darstellung; Elementaustausch und Hydraulikverbinder	84
Abbildung 105: Konstruktion der Wendeeinheit	86
Abbildung 106: Realisierung der Wendeeinheit.....	87

Abbildung 107: CAD-Zeichnung der abgeänderten und zusammengeklebten, dreiteiligen FracTherm®-Formplatte mit Holz-Grundplatte	88
Abbildung 108: CAD-Zeichnung der Evakuierungsräume an der Unterseite der abgeänderten und zusammengeklebten, dreiteiligen FracTherm®-Formplatte.	88
Abbildung 109: Außenrahmen für die Wendeeinrichtung und die Befestigung der Silikonmembran	89
Abbildung 110: Geplantes TABSOLAR®-Element mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Agraffen zur Befestigung an der Fassade	89
Abbildung 111: Bisherige Formplatte (links), Abmessungen der bisherigen Formplatte (Mitte), Abmessungen der geplanten Formplatte (rechts)	90
Abbildung 112: Formplatte für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Platz für die Fassadenbefestigungen	90
Abbildung 113: Membranspannrahmen	91
Abbildung 114: Schalung der ebenen Platte	91
Abbildung 115: Einlegeplatte mit Hydraulikanschlussabformung und Siebdübeln (links: CAD-Zeichnung, rechts: Foto)	92
Abbildung 116: Ausschnitt des geplanten Werkzeugs für die Herstellung von TABSOLAR®-Elementen mit Sammelkanälen, Hydraulikanschlussmöglichkeiten und Platz für die Fassadenbefestigungen	92
Abbildung 117: Membran-Vakuumtiefziehwerkzeug zur Herstellung von UHPC-Elementen mit Sammelkanälen und Hydraulikanschlussmöglichkeiten	93
Abbildung 118: Versuchsfläche für Tiefziehversuche am Fraunhofer ISE im Bereich der Hydraulikanschlussabformung (links), aushärtendes Pre-mix-Element (rechts)	93
Abbildung 119: Ausgeschaltetes durchströmbares Element aus Pre-mix mit Sammelkanal und Hydraulikanschlussmöglichkeit.....	94

Abbildung 120: Hydraulikanschlußmöglichkeit über Anschlußkonus und eingebettete Siebdübel	94
Abbildung 121: Ausgeprägte Fluidkanäle der FracTherm®-Struktur und des Sammelkanals.....	95
Abbildung 122: Hydraulikanschluß: einzelne Bauteile (links), montiert (rechts)	95
Abbildung 123: Druckbeständigkeitsprüfung am Anschlußbereich eines Pre-mix-Elements	96
Abbildung 124: Dichtigkeitsprüfung des Hydraulikanschlusses im Pre-mix-Block	96
Abbildung 125: Kanalstruktur mit inhomogener Querschnittsdicke der Kanalwandung (links), Rissbildung im Frischbeton beim Tiefziehen aufgrund einer erhöhten Fließgrenze (rechts).....	97
Abbildung 126: Frischbeton mit geringer (links), mittlerer (Mitte) und ausgeprägter (rechts) Fließgrenze	99
Abbildung 127: Versuchsaufbau: Versuchsbrett liegend zur Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und aufgestellt unter 45° zur Bestimmung der Fließeigenschaften (rechts)	102
Abbildung 128: Referenzmischung nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)	103
Abbildung 129: Testmischung 1 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts).....	103
Abbildung 130: Testmischung 4 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts).....	104
Abbildung 131: Finale Testmischung 10 mit geänderten Fließeigenschaften nach Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und nach Bestimmung des Fließmaßes unter 45° Neigung (rechts)	104
Abbildung 132: Referenzmischung tiefgezogen (rechts: Detail).....	105

Abbildung 133: Mischung 1: Ausbildung von Rissen im Bereich der Radien (oben und unten links), Querschnitt mit inhomogener Materialverteilung des Betons (unten rechts)	105
Abbildung 134: Mischung 8 mit verringerter Fließgrenze und abfließendem Frischbeton (oben und unten links), Querschnitt mit inhomogener Materialverteilung (unten rechts)	106
Abbildung 135: Gefüllte Werkzeughälfte nach dem Tiefziehen des Frischbetons (links), Werkzeughälfte nach dem Wenden – kein Abtropfen des Frischbetons erkennbar (rechts).....	107
Abbildung 136: Einfluss der Fließgrenze: kein Abtropfen des Frischbetons nach dem Wenden (links), abtropfender Frischbeton infolge reduzierter Fließgrenze (rechts)	107
Abbildung 137: Typische Fehlerbilder bei der Herstellung von TABSOLAR®-Elementen: nicht ausgeprägte Kanäle (links oben), schlechte Verbindung der Hälften (rechts oben), offene Kanäle (links unten), schlechtes Flussverhalten (rechts unten)	108
Abbildung 138: TABSOLAR®-Element mit nicht durchströmbaren Kanalstrukturen, trotz geeigneter Frischbetonkonsistenz	109
Abbildung 139: Werkzeughälften vorbereitet zum Betonieren.....	110
Abbildung 140: Betonierte Hälften nach dem Tiefziehen vor dem Einwenden und Zusammenfügen	110
Abbildung 141: Ausgeschaltetes TABSOLAR®-Element: Kanalseite.....	111
Abbildung 142: Ausgeschaltetes TABSOLAR®-Element: Ebene Außenseite	111
Abbildung 143: Aufgetrenntes TABSOLAR®-Element.....	112
Abbildung 144: Aufgetrenntes TABSOLAR®-Element: Detailansicht der Kanäle	112
Abbildung 145: Beispiel eines kleinen Musterelementen (links) mit durchströmbarem Kanalquerschnitt (rechts)	113

Abbildung 146: Thermografieaufnahme von durchströmten kleinen Musterelementen mit geradliniger (links) bzw. freier (rechts) H-Anordnung der Kanalstrukturen	114
Abbildung 147: Durchströmbares TABSOLAR®-Element – hergestellt bei Spürgin unter Zuhilfenahme des angepassten Verfahrens; der offene Ablauf ist rechts oben zu erkennen.....	114
Abbildung 148: Thermografie des durchströmten TABSOLAR®-Elements.....	115
Abbildung 149: Mit Hilfe eines zweiten modifizierten Membran-Vakuumtiefziehverfahrens hergestelltes kleines Musterelement (oben) mit Querschnitten (Mitte und unten)	116
Abbildung 150: Konzept Wärmedämmverbundsystem (WDVS)	117
Abbildung 151: Konzept vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF).....	118
Abbildung 152: Konzept Sandwichwand	118
Abbildung 153: Thermische Berechnung Fassadenkonzepte	119
Abbildung 154: VHF mit TABSOLAR®; von oben nach unten, links/rechts: hinterlüftet/mit Wärmedämmung als <i>Premium</i> , ohne Hinterlüftung mit Wärmedämmung/mit teilweise eingefräster Wärmedämmung zur Hinterlüftung, mit Aerogelbeton als Teil des TABSOLAR®-Elements/mit rückseitiger Wärmedämmung.....	120
Abbildung 155: Untersuchung der Dimensionen und Randbereiche eines TABSOLAR®-Elements	121
Abbildung 156: Befestigungspunkte und Traversenauslegung für vertikale und horizontale Orientierung der TABSOLAR®-Elemente	121
Abbildung 157: Varianten zur Verglasung von TABSOLAR® <i>Premium</i> bzw. TABSOLAR® <i>Economy</i>	122
Abbildung 158: Variante von TABSOLAR® <i>Design</i> mit spektralselektiver Beschichtung, jedoch ohne Witterungsschutz	123

Abbildung 159: Präsentation der drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Premium</i> , TABSOLAR® <i>Economy</i> und TABSOLAR® <i>Design</i> auf der BAU 2017 (Vorderseite)	124
Abbildung 160: Präsentation der drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Premium</i> , TABSOLAR® <i>Economy</i> und TABSOLAR® <i>Design</i> auf der BAU 2017 (Rückseite)	125
Abbildung 161: Screenshots aus der TABSOLAR®-Präsentation für die BAU 2017	125
Abbildung 162: Exponat TABSOLAR® <i>Premium</i> ohne Glasscheiben ohne (links) und mit (rechts) spektralselektiv beschichteten TABSOLAR®-Elementen bzw. Blindelementen.....	126
Abbildung 163: Exponat TABSOLAR® <i>Premium</i> während der Montage der Glasscheiben	126
Abbildung 164: Exponat TABSOLAR® <i>Design</i> ohne (links) und mit (rechts) TABSOLAR®-Elementen bzw. Blindelementen.....	127
Abbildung 165: Vorderseite (links) bzw. Rückseite (rechts) der Exponate TABSOLAR® <i>Premium</i> und TABSOLAR® <i>Design</i> auf der Messe BAU 2019	127
Abbildung 166: TABSOLAR®-Handmuster: Vorderseite mit 3D-Effekt-Oberfläche (links), Rückseite mit durchströmbaren FracTherm®-Kanalstrukturen (rechts)	128
Abbildung 167: Zeichnung eines Wandaufbaus von TABSOLAR® <i>Design</i> mit UHPC mit Kanalstruktur, zwei isolierenden Schichten (jeweils 7,5 cm unterschiedliche Mineralwolle) und einer Betonwand (20 cm) innen (von außen nach innen)	130
Abbildung 168: Wirkungsgrad von TABSOLAR® <i>Premium</i> mit unterschiedlichen Abständen zwischen Absorber und Abdeckscheibe	131
Abbildung 169: Skizze von TABSOLAR® <i>Premium</i> mit Bilanzhülle.....	134
Abbildung 170: Schematische Darstellung des simulierten Systems für die Sanierungspfade 1 und 2 aus Abbildung 174.....	139

Abbildung 171: Schematische Darstellung des simulierten Systems für Sanierungspfad 3 aus Abbildung 174	139
Abbildung 172: Vereinfachtes Eisspeicher-Modell, Modelica-Screenshot	140
Abbildung 173: Dimensionierung von Eisspeicher und Kollektorfeld (unabgedeckt, spektralselektiv und abgedeckt, spektralselektiv), Auszug aus [3]	141
Abbildung 174: Visualisierung dreier verschiedener Sanierungspfade eines mittleren Mehrfamilienhauses der Baualtersklasse II (1958-78).....	144
Abbildung 175: Zeichnung zur Darstellung der für TABSOLAR® geplanten Unterkonstruktion.....	149
Abbildung 176: Vergleich der für die Herstellung und Entsorgung benötigten Primärenergie verschiedener Varianten der TABSOLAR®-Produktfamilien mit einer passiven UHPC-Verkleidung und einem Standard-Kollektor, jeweils als vorgehängte hinterlüftete Fassade, sowie einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS)	153
Abbildung 177: Vergleich des bei der Herstellung und Entsorgung entstehenden Treibhauspotenzials verschiedener Varianten der TABSOLAR®-Produktfamilien mit einer passiven UHPC-Verkleidung und einem Standard-Kollektor, jeweils als vorgehängte hinterlüftete Fassade, sowie einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS)	153
Abbildung 178: Kumulierter Primärenergieaufwand für die drei Sanierungspfade über einen Zeitraum von 25 Jahren.....	155
Abbildung 179: Treibhauspotenzial (GWP100) für die drei Sanierungspfade über einen Zeitraum von 25 Jahren.....	155
Abbildung 180: Mittlere Kostenschätzung für TABSOLAR®- <i>Design</i> - und TABSOLAR®- <i>Premium</i> -Kollektoren, jeweils ohne Unterkonstruktion und Installation (gepunktet) und mit Unterkonstruktion und Installation (durchgezogene Linien). In lila sind beispielhafte Kosten für einen Standard-Kollektor mit Aufdachmontage dargestellt [15]. Der grau hinterlegte Bereich zeigt den Kostenrahmen für verschiedene gebaute Kollektorfassaden [15], der orange hinterlegte Bereich den Kostenrahmen für Eternit-Fassaden.	157

Abbildung 181: Mittlere Kostenschätzung für TABSOLAR® <i>Heat & Cool</i> . Der grau hinterlegte Bereich zeigt den Kostenrahmen für geschlossene Kühldecken mit Kupfermäander. Vertriebskosten, Kosten für Unterkonstruktion und für die Installation sind nicht berücksichtigt, weder für TABSOLAR® <i>Heat & Cool</i> noch für die Referenz-Kühldecken. Die Kosten beziehen sich auf 125 Watt Wärmeleistung.	158
Abbildung 182: Entwurf »Einfamilienhaus« aus TABSOLAR®-Elementen	159
Abbildung 183: LUX Berlin (Quelle: axthelm+rolvien).....	160
Abbildung 184: Erste Entwürfe für Demonstrationsgebäude.....	163
Abbildung 185: Explosionszeichnung eines Demonstrationsgebäudes.....	163
Abbildung 186: Schnittmodell eines mobilen Demonstrationsgebäudes (LKW-Auflieger) als Ausstellungsraum (oben) bzw. als Besprechungsraum (unten).	164
Abbildung 187: Auszug aus der Detailentwicklung des mobilen Demonstrationsgebäudes (LKW-Auflieger)	164
Abbildung 188: Modulares, transportables Demonstrationsgebäude; Entwurf (oben) und Explosionszeichnung (unten).....	165
Abbildung 189: Aktualisierter Entwurf für modulares Demonstrationsgebäude	166
Abbildung 190: Muster inklusive Fassadenaufbau für die Messeexponate TABSOLAR® <i>Design</i> (links) und TABSOLAR® <i>Premium</i> (rechts)	166

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest (und Vergleich mit Probe ohne Lack)	28
Tabelle 2: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Lack 1 – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest	30
Tabelle 3: Ergebnisse der Proben mit Aufbau UHPC – Lack 3 – Sputterschicht – Lack nach Klimaschranktest	32

Tabelle 4: Ergebnisse der Proben mit Aufbau Lack 1 – Sputterschicht – 2 * Lack 1 auf UHPC von G.tecz bzw. Spürgin gefertigt nach Klimaschranktest	35
Tabelle 5: Ergebnisse der Proben mit Aufbau Lack 3 – Absorber – 2 * Lack 1 auf UHPC von G.tecz bzw. Spürgin gefertigt nach Klimaschranktest	38
Tabelle 6: Ergebnisse der 5. Versuchsreihe	40
Tabelle 7: Probenmaße und Bruchspannungen  . *Bruch entlang Kontaktfläche	66
Tabelle 8: Mischungsvariation	98
Tabelle 9: Frischbetoneigenschaften von Kontrollmischungen	98
Tabelle 10: Mit COMSOL simulierte Fälle, um die thermischen Widerstände im Knotenmodell zu berechnen	130
Tabelle 11: Simulation der drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Design, Economy</i> und <i>Premium</i> in einem Stagnationsfall mit konstanter Einstrahlung und mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten h_{ext} von der äußersten Schicht des Kollektors an die Umgebungsluft. T5 entspricht der Temperatur der Absorberoberfläche, T7 der Temperatur der raumseitigen Oberfläche und T_{int} der Raumtemperatur.	132
Tabelle 12: Simulation der drei Produktfamilien TABSOLAR® <i>Design, Economy</i> und <i>Premium</i> in der Stagnation über ein Jahr mit den Klimadaten einer Südfassade in Frankfurt am Main. Gezeigt sind die maximalen Temperaturen und die dabei entstehenden Energieströme für zwei verschiedene äußere Wärmeübergangskoeffizienten h_{ext} . T5 entspricht der Temperatur der Absorberoberfläche, T7 der Temperatur der raumseitigen Oberfläche und T_{int} der Raumtemperatur.	133
Tabelle 13: Übersicht über die anhand von FEM-Simulationen bestimmten thermischen Widerstände	134
Tabelle 14: Übersicht über optische Parameter	135
Tabelle 15: Übersicht über die Parameter der stationären Simulation	135

Tabelle 16: Ergebnisse einer Jahressimulation für die Produktfamilien TABSOLAR® <i>Design</i> , <i>Economy</i> und <i>Premium</i> sowie einen kommerziellen Flachkollektor und eine Wand ohne Solarthermiefunktion als Referenzen. Gezeigt sind die von dem Wandaufbau absorbierte Energie Q_{abs} , der solarthermische Ertrag Q_{use} , der Wärmestrom nach außen Q_{ext} und der Wärmestrom nach innen Q_{int}	136
Tabelle 17: Voraussichtliche Bruttokollektorerträge der TABSOLAR®-Produktfamilien in [kWh/(m ² a)] bei 45° und 90° Anstellwinkel, jeweils bei verschiedenen Kollektormitteltemperaturen mit Ausrichtung nach Süden am Standort Würzburg berechnet mit ScenoCalc Ver. 6.0	138
Tabelle 18: Ergebnisse Jahressimulation	141
Tabelle 19: Verschiedene LCA-Ziele im Zusammenhang mit energiebereitstellenden Gebäudehüllenelementen (z. B. solarthermische Kollektoren) mit den dazugehörigen Systemgrenzen	143
Tabelle 20: Übersicht Flächen mittleres Mehrfamilienhaus	144
Tabelle 21: Sachbilanz von 1 m ² TABSOLAR® <i>Design</i>	146
Tabelle 22: Sachbilanz von »1 m ³ Ultrahochleistungsbeton, gemischt« basierend auf persönlicher Kommunikation mit T. Sablotny von G.tecz und den Rezeptangaben des Rezepts M1Q in [9]	147
Tabelle 23: Sachbilanz von 1 Kilogramm »Superplasticizer production, custom« basierend auf [10]	148
Tabelle 24: Sachbilanz für 1 m ² Membranvakuum-Tiefziehen von UHPC (»deepdrawing UHPC, custom«). Annahme: Membran kann zweimal benutzt werden und wiegt 200 g. Die Serienproduktionsanlage mit den Tiefziehwerkzeugen wurde hier noch nicht berücksichtigt, zumal noch keine Daten dafür vorliegen, weil bisher nur eine Technikumsanlage für manuelle Fertigung existiert.	148
Tabelle 25: Sachbilanz für einen Fluidanschluss (»fluid connectors, custom«)	149
Tabelle 26: Sachbilanz für 1 m ² Unterkonstruktion für vorgehängte, hinterlüftete Fassade (passiv oder aktiv) (»substructure, custom«). Darin	

enthalten sind Agraffen, Abstandhalter (TABSOLAR®-Agraffe), Traversprofile, Unterkonstruktion vertikale L-Profile, Halterung nach Abbildung 175. 149

Tabelle 27: Sachbilanz von 1 m² Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Mineralwolle (120 mm) mit einem U-Wert von 0,29 W(m²K) für die Sanierung basierend auf den Datenblättern [11], [12], [13], [14] und persönlicher Kommunikation mit Dr. Thomas Loewenstein von Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH 150

Tabelle 28: Sachbilanz von 1 m² spektralselektiver Beschichtung von UHPC. Dieser Datensatz basiert auf dem Datensatz »selective coating, copper sheet, sputtering [DE]«. Der Wert des benötigten Stroms wurde verdoppelt, da die Vakuum-Pumpe wesentlich länger für ein ausreichendes Vakuum pumpen musste. Außerdem wurden Aluminium und Titandioxid, die in dem Schichtaufbau vorkommen, hinzugefügt. 151

Tabelle 29: Sachbilanz der Vortrocknung von 1 m² TABSOLAR®-Absorber gemäß der aktuellen Praxis am Fraunhofer ISE. Dieser Prozess muss überarbeitet werden, sobald bessere Daten zur benötigten Vortrocknung existieren. 152

Tabelle 30: Mögliche TABSOLAR®-Anwendungen 161

Tabelle 31: Übersicht über Aktivitäten und Veröffentlichungen in TABSOLAR II 170

7 Literaturverzeichnis

- [1] U. Leibfried, S. Fischer und S. Asenbeck, „PVT-Wärmepumpensystem SOLINK - Systemvalidierung und zwei Jahre Praxiserfahrung,“ Pforzheim, Deutschland, Conexio GmbH, 2019.
- [2] Ş. Alibaş, „Simulation of PVT Collectors as Heat Source to Heat Pumps in Multi Family Houses,“ Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2019-11-26.
- [3] D. Philippen, Carbonell, D. Zenhäuser, D, M. Granzotto, M. Haller und S. Brunold, *High-Ice - System development for high solar thermal gains with ice storage and heat pump*, SPF Institut für Solarthechnik, Hochschule für Technik Rapperswil HSR im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE, Hrsg., p. 107.
- [4] B. Ebert, *LowEx-Bestand Analyse Abschlussbericht zu AP 1.1*, Karlsruher Institut für Technologie, Hrsg., p. 84.
- [5] C. Pouloupoulos, „Life Cycle Assessment of a Multifunctional Solar Thermal Facade System and a Reference Model,“ University of Freiburg, Freiburg, 2015-01-08.
- [6] T. Heck, „Wärmepumpen, Teil X, Data v2.0 (2007),“ Dübendorf, CH.
- [7] N. Jungbluth, *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*, R. e. a. Dones, Hrsg., Dübendorf, CH.
- [8] M. Stucki und N. Jungbluth, *Update of the Life Cycle Inventories of Solar Collectors*, ESU-services Ltd., Hrsg., Uster, Schweiz.
- [9] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann, B. Middendorf, Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC), Heft 1, No. 1 Hrsg., Kassel: kassel university press, 2005.
- [10] Thorsten Stengel und Peter Schießl, „Sustainable Construction with UHPC - from Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment,“ Heft 10, No. 10 Hrsg., Kassel, kassel university press, 2008.

- [11] Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, *Capatect Klebe-und Armierungsmasse 186M - Technische Information Nr. 186*, CAPAROL, Hrsg., Ober-Ramstadt, p. 3.
- [12] Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, *Capatect MW-Fassaden-Dämmplatte 149 WHITE WLZ 035 - Technische Information Nr. 149*, Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Hrsg., Ober-Ramstadt, p. 3.
- [13] Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, *Capatect Mineralputz - Technische information Nr. 146*, Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Hrsg., Ober-Ramstadt, p. 4.
- [14] Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, *Capatect-Gewebe 650/110 - Technische Information Nr. 650/110*, Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Hrsg., p. 2.
- [15] C. Cappel, W. Streicher, M. Hauer, F. Lichtblau, T. Szuder, T. Kuhn und C. Maurer, "AKTIFAS" Fassadenintegrierte Solarthermie: Bestandsaufnahme und Entwicklung zukunftsfähiger Konzepte. Die Zukunft fassadenintegrierter Solarthermie, Schlussbericht, Projekt Aktifas, Freiburg/Brsg.: Fraunhofer ISE, 2015.