C³ BASISVORHABEN 4

MULTIFUNKTIONALE BAUTEILE AUS CARBONBETON

Bundesministerium für Bildung und Forschung
zwanzig20 PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION
C3 carbon concrete composite
ai:L Institute for Advanced Architectural and Urban Studies ARCHITEKTUR-INSTITUT LEIPZIG
HTWK Leipzig

INHALT

VORWORT 5
Prof. Frank Hülsmeier

C³BASISVORHABEN 4 6
Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton

C³INFRALIGHT 8
Gebäudehüllen aus Infralightbeton

C³SANDWICH 12
Hochgedämmte Sandwichfassade

C³PV 16
Energie gewinnen - Integration von PV

C³SUPERCON 20
Energie speichern

C³DAYLIGHT 24
Tageslichtnutzung mittels lichtleitender Fasern

C³LED 28
Integration von Leuchtdioden

C³SENSE 32
Integration von Sensoren

C³LINK 36
Synergetische Vernetzung

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 40

ANSPRECHPARTNER 41

VORWORT

Was müsste ein zukünftiger Baustoff leisten, um den Stahlbeton zu ersetzen, ihn gleichsam zeitgemäß neu zu erfinden? Diese Kernfrage hat sich unser Team energie*design* schon in der Beantragung des gesamten Zwanzig20-Projektes Carbon Concrete Composite gestellt und mit der Thematik des Basisvorhabens B4 - Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton einen ersten Baustein unserer Vision formuliert. Den Stahl durch Carbon zu ersetzen, die Matrix zu optimieren und damit effizienter und leichter zu bauen sind sicherlich wesentliche Verbesserungen, jedoch noch keine Revolution - vielmehr ein ambitioniertes ingenieurtechnisches Vorhaben. Welche Eigenschaften können darüber noch hinausweisen und an fundamentale Entwicklungen unserer Wissensgesellschaft anbinden? Wir sind der festen Überzeugung, dass die technische Funktionalisierung sich nicht nur in portablen technischen Geräten erschöpft, sondern dass sich unser Verständnis von Baustoffen und Bauteilen grundlegend verändern wird. So wie das Smartphone viele technische Erfindungen - vom Telefon über den Plattenspieler bis zur Fernbedienung - ersetzt hat, werden zukünftige Gebäude technische Funktionen nicht wie bisher nur additiv, sondern integrativ anbieten. Energie sammeln und speichern, heizen und lüften, beleuchten und kommunizieren werden wir in hybriden Bauteilen neu denken müssen.

Die Komplexität dieser Herausforderung legt nahe, dass weder ein einzelnes Team, ein Forschungsprojekt oder ein Berufsstand aus eigener Kompetenz oder Weitsicht die Lösung voraussehen, geschweige denn erarbeiten kann. Daher ist die Einbindung anderer Fachdisziplinen, Institutionen und Unternehmen Grundvoraussetzung für den Erfolg. Die Moderation dieses Prozesses könnten Architekten aufgrund ihrer zentralen Stelle in Entwurf und Realisierung von Bauprojekten übernehmen.

Methodisch verfolgt das B4 explorative und experimentelle Ansätze, um das Potential des faserarmierten Betons auszuloten. Nicht die ingenieurtechnische Versuchsreihe, sondern das direkte Umsetzen einer Vielzahl von Ideen in erste Versuchsstücke im Maßstab 1:1 sind das Ziel. Vielversprechende Ansätze sollen herauskristallisiert und in anschließenden Forschungsvorhaben detailliert untersucht werden. Experiment und Zufall liegen in dieser Methodik eng beieinander. Viele Ansätze ergeben auch beiläufig neue Erkenntnisse auf anderen Gebieten. So wurden beispielsweise im Zuge der Integration von LED-Lichtquellen in Carbonbeton Synergien zur Verbesserung der Raumakustik und der textilen Anmutung von Betonbauteilen entdeckt. Der Architekt Daniel Libeskind beschreibt es so: „Ich bin dem Zufall gefolgt. Ich glaube ohnehin, im Leben solltest du keine Ziele haben, sonst schränkst du dich viel zu sehr ein." [ZEIT, 28.04.2016].

Freilich gibt es noch große Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Langlebigkeit und Austauschbarkeit der in die Bauteile integrierten technischen Komponenten. Wir bedanken uns ausdrücklich für die Ideen und Inspirationen unserer Partner und freuen uns auf die gemeinsame Lösungsfindung - und Überraschendes mehr.

Prof. Frank Hülsmeier | Architekt
im Oktober 2016

GEBÄUDEHÜLLE
SYNERGIEN
FUNKTIONS
INTEGRATION

C^3 BASISVORHABEN 4

MULTIFUNKTIONALE BAUTEILE AUS CARBONBETON

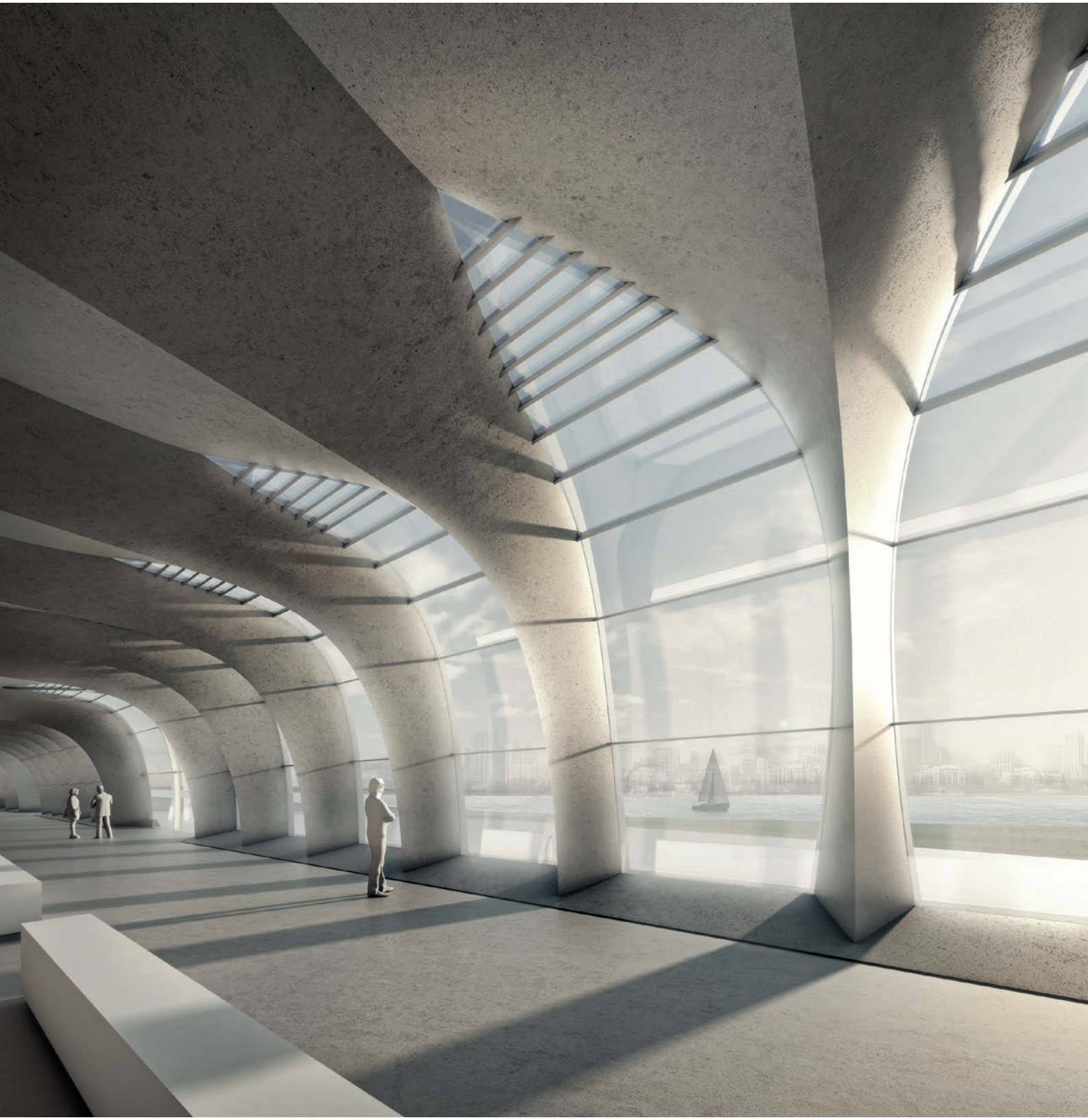
Im Basisvorhaben 4 „Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton - Am Beispiel der aktivierten Gebäudehülle“ wurden anhand der Carbonbeton-Gebäudehülle Potentiale und mögliche Anwendungen des neuen Verbundwerkstoffes aufgezeigt.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Zeitraum von Jul. 2015 bis Dez. 2016 geförderte Vorhaben ist Teil des Forschungskonsortiums „C^3 - Carbon Concrete Composite“, welches sich der Etablierung von Carbonbeton im Bauwesen widmet. Dabei ist das Thema der Multifunktionalität ein wesentlicher Bestandteil der Vorteilhaftigkeit von Carbonbeton gegenüber klassischen Materialien wie Stahlbeton: Er bietet neben seinen herausragenden mechanischen Eigenschaften auch die Möglichkeit einer Aktivierung der textilen Bewehrung, um gebäudetechnische Funktionen eines Bauwerks synergetisch in vorgefertigte Bauelemente zu integrieren. Im Basisvorhaben 4 wurde in den Themenbereichen Gebäudehülle, Funktionsintegration und Synergetische Vernetzung mit insgesamt 17 Partnern und 4 assoziierten Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft explorativ geforscht. Ziel der insgesamt acht Arbeitsgruppen des B4 war die Entwicklung von ästhetischen Gesamtlösungen, die schließlich als Funktionsmuster umgesetzt wurden. Die praktische Umsetzung soll die Potentiale der entwickelten Ansätze verdeutlichen und mögliche Problempunkte aufzeigen.

Der Themenbereich Gebäudehülle untersuchte das Potential von Carbonbeton für energieeffiziente Gebäudehüllen. Schwerpunkte darin waren tragende massive Wandkonstruktionen aus homogenem und funktional geschichtetem Infraleichtbeton, als auch dreidimensional geformte Carbonbeton-Sandwichkonstruktionen. Um die Potentiale von Carbonbeton-Bauteilen in der Gebäudehülle zu nutzen, wurden unterschiedliche Formenkonzepte und entsprechende Bewehrungs- und Verbindungslösungen aus textilen Gelegen bzw. Stäben in Carbon und Basalt erarbeitet.

Das Potential des Verbundwerkstoffes Carbonbeton für die Integration von Zusatzfunktionen wurde im Bereich „Funktionsintegration“ evaluiert. Ziel war es, elektrische und digitale Funktionen wie das zerstörungsfreie Überwachen von Bauteilen, die Energiegewinnung mittels Photovoltaik, die direktelektrische Energiespeicherung sowie die LED-Beleuchtung einschließlich ihrer nötigen Infrastruktur gleich in der Gebäudehülle bereitzustellen. Die passive Funktionalisierung der gedämmten Fassade mittels Lichtleitern soll deren Gestaltungsvielfalt sowie die Tageslichtausleuchtung in Räumen erhöhen. Im B4 wurden dazu funktionale, effiziente und ästhetische Lösungen erarbeitet.

Neben den Arbeitsgruppen, die sich mit der Gebäudehülle und den verschiedenen Funktionsintegrationen befassten, machte sich der dritte Themenbereich die Vernetzung des Basisvorhabens 4 mit anderen C^3-Vorhaben und die inhaltliche Verknüpfung der B4-Arbeitsgruppen untereinander zur Aufgabe. Dazu begleitete es die Forschung inhaltlich und strukturell und betrachtete die Ergebnisse unter wirtschaftlichen, ökologischen und technischen Gesichtspunkten. Zudem wurden übergreifende elektrotechnische Konzepte entwickelt und die Arbeitsgruppenergebnisse in einem übergreifenden Demonstrator zusammengeführt.



BETEILIGTE PARTNER

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Architektonische Konzepte & konstruktive Lösungsansätze

Solidian GmbH
Weiterentwicklung & Herstellung von Carbongelegen

TU Berlin - Institut für Bauingenieurwesen
Bemessungskonzepte & Belastungsversuche

ASSOZIIERTE PARTNER

Deutsche Basalt Faser GmbH
Weiterentwicklung & Herstellung Basaltgelege, -seile & -fasern

Evonik Resource Efficiency GmbH
Weiterentwicklung von CALOSTAT® Dämmschüttung

Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteile e. V.
Fachliche Beratung

C³INFRALIGHT

GEBÄUDEHÜLLEN AUS INFRALEICHTBETON

Im Teilprojekt C³Infralight wurden tragende massive Wandkonstruktionen aus homogenem und funktional geschichtetem Infraleichtbeton (ILC) untersucht. Eine Gebäudehülle aus Infraleichtbeton bietet das Potential, massive Wandkonstruktionen aus Beton den zukünftigen Dämm- und Qualitätsanforderungen von Gebäuden anzupassen, indem die Betonmatrix modifiziert wird bzw. Funktionszonen innerhalb des Betons ausgebildet werden. Ziel dieser Modifikation ist es, zukünftig geringere Wanddicken mit höherer Dämmwirkung zu ermöglichen, und so Ressourcen und Kosten zu sparen. Für die massiven Gebäudehüllen sind unterschiedliche Bewehrungskonzepte erarbeitet worden, um eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Schwindverhalten) der Wand zu erreichen. Außerdem wurde eine hochfeste Feinbetonmatrix an den Außenseiten des ILC-Wandquerschnittes ergänzt. Dadurch sollen die Eigenschaften Dauerhaftigkeit und Sichtbetonqualität verbessert werden. Die Projektbearbeiter im Teilvorhaben „C³Infralight" waren die TU Berlin, das Architektur-Institut Leipzig der HTWK Leipzig (ai:L) sowie die Solidian GmbH. Unterstützung erhielt das Vorhaben durch die assoziierten Partner Deutsche Basalt Faser GmbH (DBF), Evonik Resource Efficiency GmbH und Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. (FDB).

BETONEIGENSCHAFTEN

Nach den Vorbetrachtungen und der Formulierung der materiellen Anforderungen konnte die TU Berlin die Festbetoneigenschaften des ILC durch eine weitere Optimierung des Mixdesigns verbessern. Die Druckfestigkeit konnte beispielsweise - ausgehend von 6 MPa bei 600 kg/m³ Trockenrohdichte - um 30 % auf ca. 8 MPa gesteigert werden. Analog konnten für einen ILC800 statt 13 MPa nun 18 MPa erreicht werden. Durch die Zugabe von Basaltfasern wurde das Schwindmaß des Betons zudem um etwa 20 % reduziert. Das Zusammenwirken von ILC und Basaltbewehrung wurde durch Pullout-Tests und Balkenversuche untersucht. Diese erfolgten in Anlehnung an bekannte Verfahren, wobei die Ergebnisse mit denen der Materialkombinationen ILC mit Stahlbewehrung bzw. ILC mit einer Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) verglichen wurden: Das Verbund- und Biegetragverhalten von ILC mit Basaltbewehrung ist aufgrund ähnlicher Materialcharakteristik vergleichbar mit GFK-bewehrten ILC-Bauteilen. Die klassische Bauweise von ILC-Fassaden besitzt aufgrund der hohen Porendichte und der massiven, statisch wirkenden Wandquerschnitte keine sonderlich ansprechende Optik. Jedoch bietet das

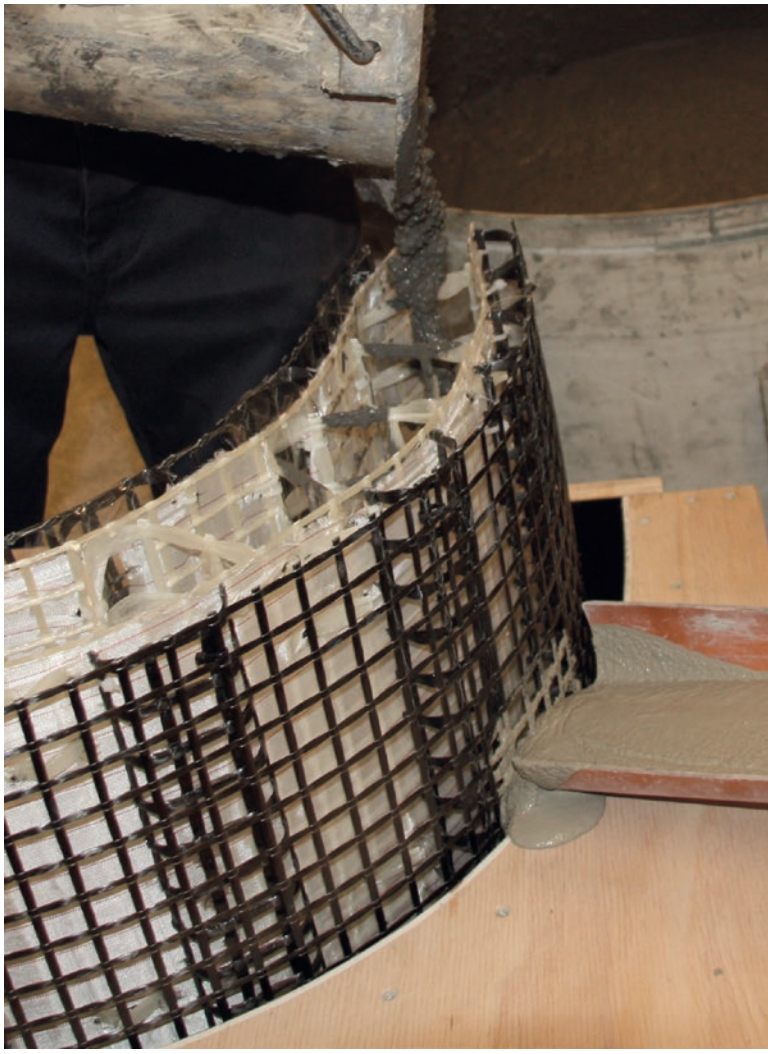


Abb. 1 - Gleichzeitige Betonage von ILC und Feinbeton

Material Beton die Möglichkeit, diese Massivität durch neue Formgebungen und den Einsatz einer Sichtbetondeckschicht aufzuheben. Zentrale Herausforderung dabei war die Entwicklung einer textilen Bewehrung, die eine dynamische Formgebung gewährt und gleichzeitig statisch wirksam ist.

BETONAGEVERFAHREN

Um das optische Erscheinungsbild zusätzlich zu verbessern, wurde ein Betonierverfahren vom ai:L entwickelt, welches die Außenschichten aus Feinbeton zeitgleich mit dem Kern aus ILC erstellt. Die Trennung der beiden Schichten stellt ein Textil sicher, welches am Bewehrungskorb befestigt ist. Der Bewehrungskorb wurde von Solidian GmbH hergestellt (vgl. Abb. 1).

Zur Untersuchung der Interaktion zwischen ILC und Feinbeton als Deckschicht wurden von der TU Berlin Haft- und Scherzugversuche durchgeführt. Um die Einsatzmöglichkeiten von ILC-Modulen zu vergrößern, wurde im C^3Infralight zudem eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, ILC-Wandbauteile auf der Baustelle zu produzieren. Zu diesem Zweck wurde die Idee für ein Halbfertigbauteil entwickelt, welches aus zwei durch ein dreidimensional geformtes Basaltseil verbundenen Feinbetonschalen besteht, in die auf der Baustelle der Kern aus ILC-Beton gegossen wird. Somit könnte der aufwändige und kostenintensive Transport massiver Wandbauteile vermieden werden.

BEWEHRUNG

Zur dreidimensionalen Bewehrung des Halbfertigteils wurde von der DBF ein Seil aus Basaltfaserrovings gezwirnt, in Harz getränkt, verformt und ausgehärtet. Konventionelle Carbon- und Basaltstäbe verfügen nur in einaxialer Richtung über hohe Zugfestigkeiten. Im Vergleich zu diesen Stäben erzielt das Basaltseil zwar geringere Zugfestigkeiten in einaxialer Richtung, jedoch ist zu untersuchen, ob durch die Verdrehung des Seils eine Erhöhung der

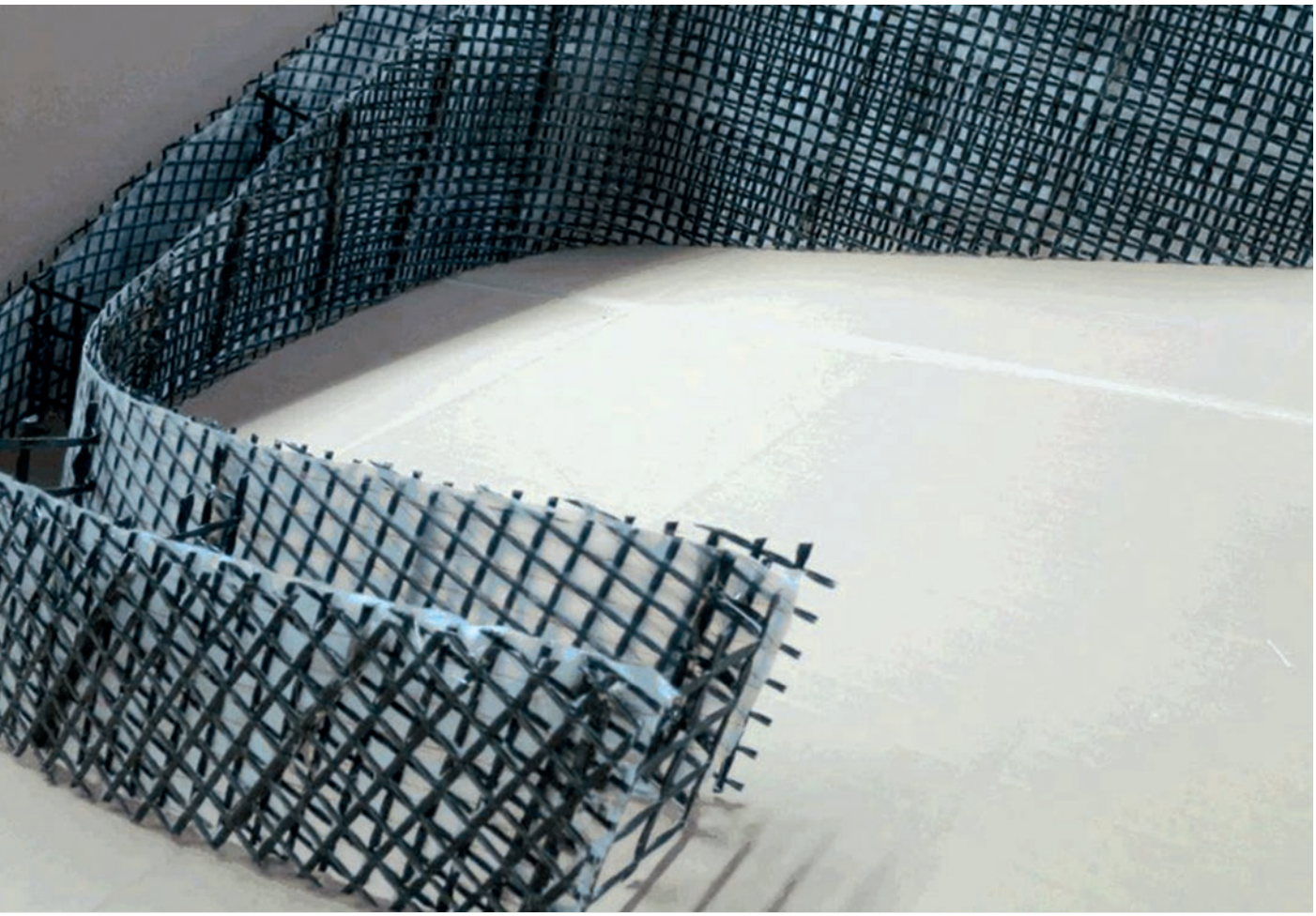


Abb. 2 - Schubgitter aus Carbongelegen

Zugfestigkeiten in mehraxialer Richtung entsteht. Da das Einsatzgebiet der Seile in dreidimensional geformten Bauteilen liegt, wäre diese Eigenschaft sehr von Vorteil. Darüber hinaus wurden vom Partner Solidian 3D-geformte Bewehrungsstrukturen mit Vlieseinlage und Schubgittern hergestellt, die eine funktionale Schichtung von ILC und Feinbeton ermöglichen (Abb. 2).

FUNKTIONSMUSTER

Um eine praktische Anwendungsmöglichkeit der bislang theoretisch gewonnenen Erkenntnisse zu demonstrieren, wurde ein Funktionsmuster entwickelt, welches die Vorteile der Verwendung eines mehrschichtigen Wandaufbaus aus Feinbeton und ILC-Beton mit einer textilen Bewehrung veranschaulicht (Abb. 3). Es zeigt, dass die Massivität klassischer massiver und geradliniger Bauteile durch eine entsprechende Formgebung aufgehoben werden kann und, dass die Herstellung eines bauphysikalisch optimierten, mehrschichtigen Wandaufbaus mit tragender Funktion möglich ist. Trotz Freiform des Bauteils kann die Gebäudehülle ohne komplizierten Schichtaufbau und Anschlussdetails (Anbindung an Dach und Boden) erstellt werden, welche bei klassischen Fassaden ein gewisses Schadenpotential mit sich bringen. Die Lastabtragung kann durch zwei verschiedene Bewehrungsmethoden unterstützt werden: Zum einen durch dreidimensional geformte Basaltseile der DBF anstelle von Bewehrungsstäben. Zum anderen kann die Aufnahme der mechanischen Kräfte durch das an die C-Form angepasste Schubgitter aus Carbonfasern vom Partner Solidian gewährleistet werden.

Das umgesetzte Ergebnis von C³Infralight zeigt die dynamischen Formgestaltungsmöglichkeiten in Bauteilen, die trotz des Kerns aus Infraleichtbeton nicht auf die optisch ansprechendere Wirkung von Feinbeton verzichten müssen und somit neue Einsatzfelder für Infraleichtbeton mit einer textilen Bewehrung erschließt.

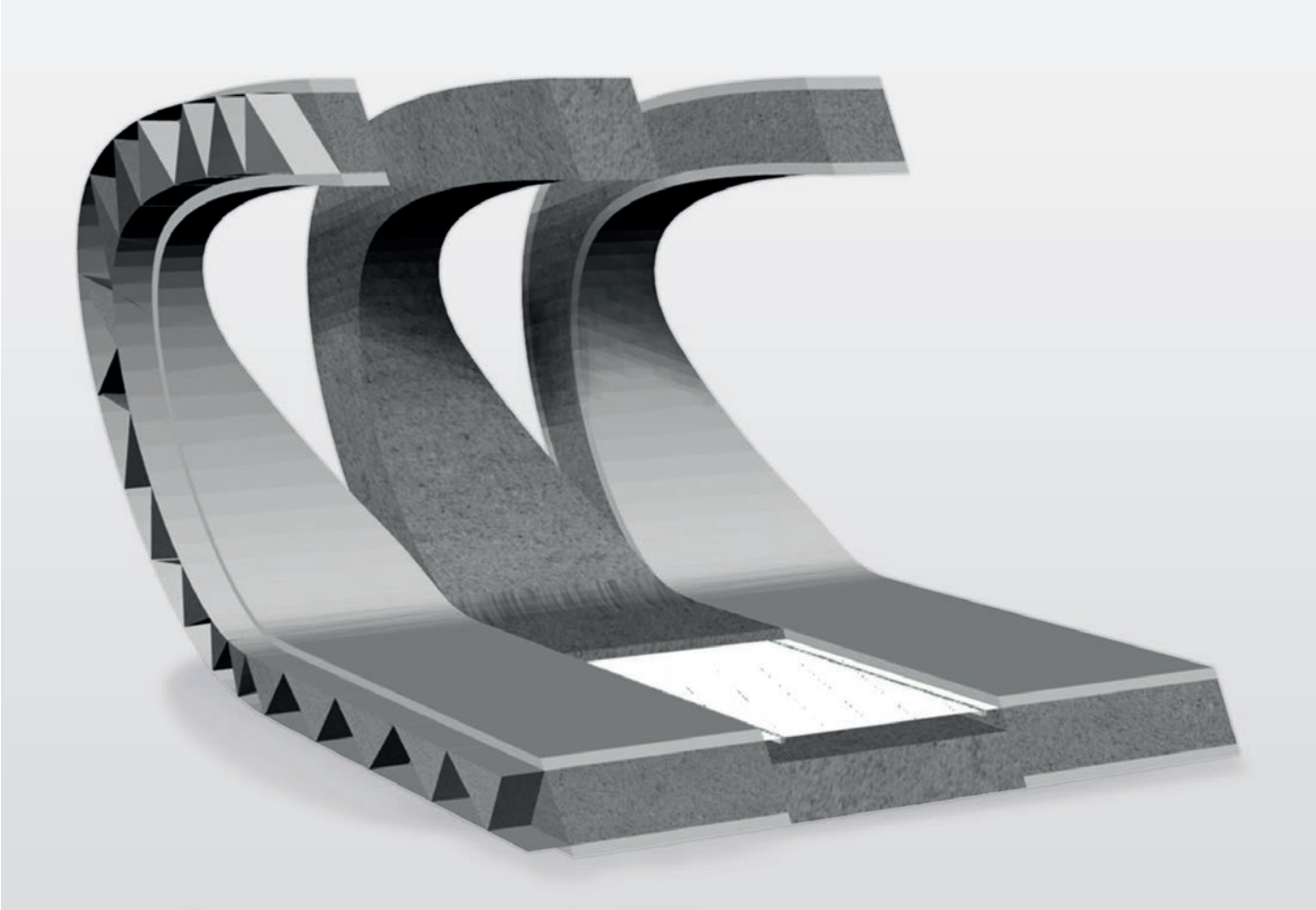
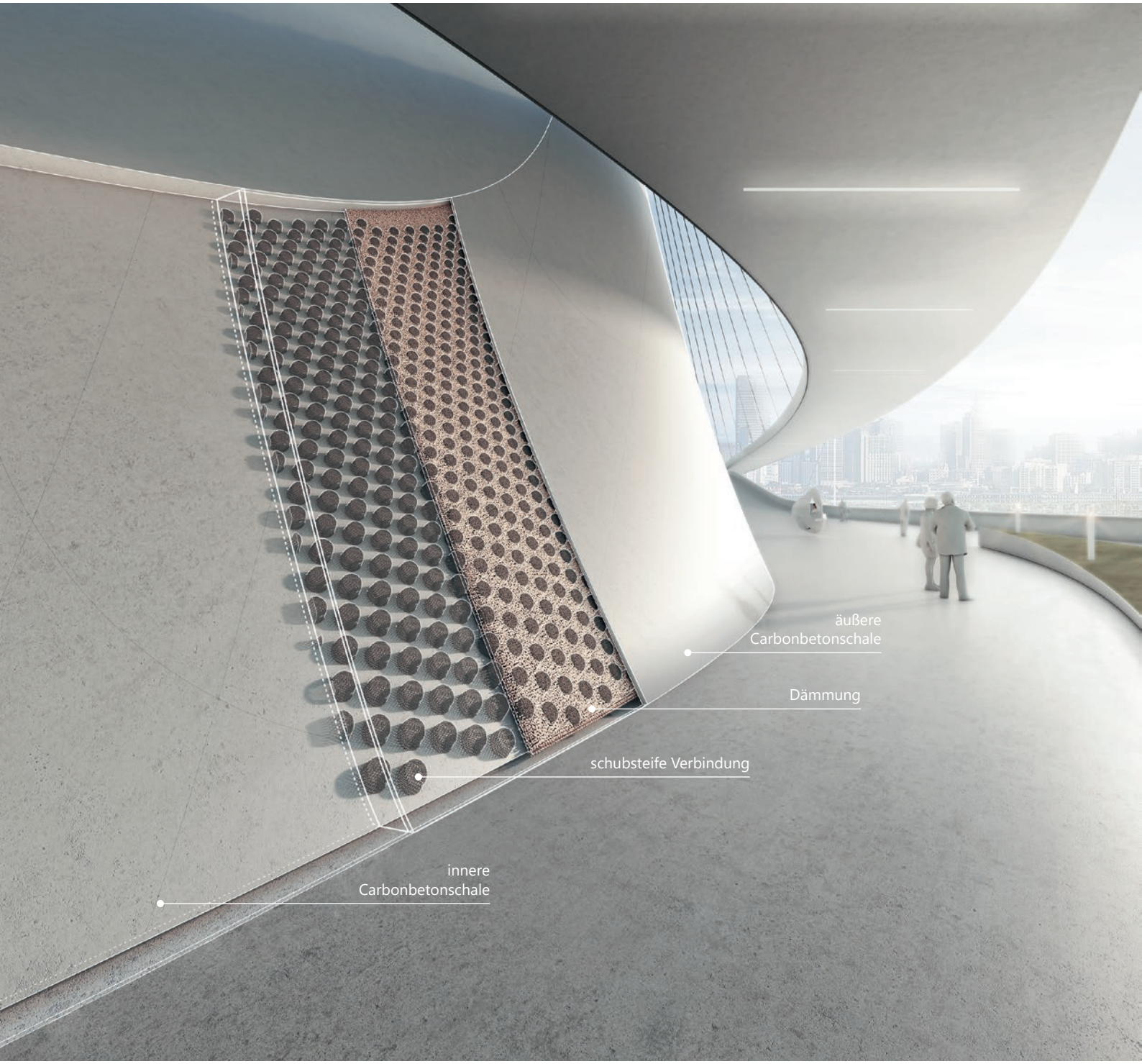


Abb. 3 - Visualisierung der C³Infralight-Demonstratoren



BETEILIGTE PARTNER

Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH
Wölbstrukturierung

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Architektonische Konzepte & Prüfkörperherstellung

RWTH Aachen - Lehrstuhl und Institut für Massivbau
Belastungsversuche

Solidian GmbH
Weiterentwicklung & Herstellung von Carbongelegen

Uni Stuttgart - Institut f. Leichtbau Entwerfen & Konstruieren
Sandschalungstechnologie & Betonimplantate

ASSOZIIERTE PARTNER

Deutsche Basalt Faser GmbH
Weiterentwicklung & Herstellung Basaltgelege & -vlies

Evonik Resource Efficiency GmbH
Dämmtechnologie

Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V.
Fachliche Beratung

Halfen GmbH
Befestigungstechnik

C³SANDWICH
HOCHGEDÄMMTE SANDWICHFASSADE

Das Teilvorhaben C³Sandwich widmete sich der Entwicklung von dreidimensional geformten Sandwichfassaden mit möglichst schlankem Wandquerschnitt, welche architektonische Freiformen und einen optimierten Lastabtrag durch Krümmung und Faltung der Gebäudehülle ermöglichen. Die schubsteife Verbindung der beiden Sandwichschalen sollte durch geformte bzw. strukturierte textile Strukturen gewährleistet werden.

GEOMETRIE-ENTWICKLUNG

Für das Ziel eines optimierten Lastabtrags wurden zunächst geometrische und parametrische Formstudien durchgeführt, wobei eine Kurve oder Linie die Grundgeometrie beschreibt, welche durch Einflussfaktoren z. B. aus dem Raumprogramm oder Belichtungs- und Verschattungsanforderungen durch Aufwerfen, Flachziehen oder Verbiegen horizontal und vertikal verformt wird. Dies erzeugt eine Formenvielfalt in der Fassadenoberfläche, die aufgrund von Standortbedingungen und Gebäudeanforderungen individuell unterschiedlich ist (Abb. 1). Das Prinzip der geometrischen Verformung zur Erhöhung der Tragfähigkeit wurde auch für die Verbindung der Sandwichschalen aus textilen Gelegen herangezogen, welche die Anforderungen an Schub-, Zug- und Drucksteifigkeit erfüllen muss.

WÖLBSTRUKTURIERUNG

Um das textile Verbindungsmittel möglichst werkstoff- und oberflächenschonend in eine dreidimensionale Form zu bringen, wurde das Wölbstrukturierungsverfahren angewendet. Dieses basiert auf einem selbstorganisierenden Beulungsprozess und wird bisher in Blechmaterialien eingesetzt, um vor allem für Leichtbauanwendungen Material durch eine erhöhte Biegesteifigkeit einzusparen. Die Machbarkeit der Strukturierung der Verbindungsmittel wurde an fünf Textilien unterschiedlicher Hersteller und Materialien überprüft. Eines dieser Textilien war ein Carbongitter des Partners Solidian GmbH, welches für weitere Untersuchungen ausgewählt wurde. Im Rahmen des Vorhabens erfolgten anschließend Untersuchungen zur Strukturierung und Formgebung von mehrlagigen Carbonpro-

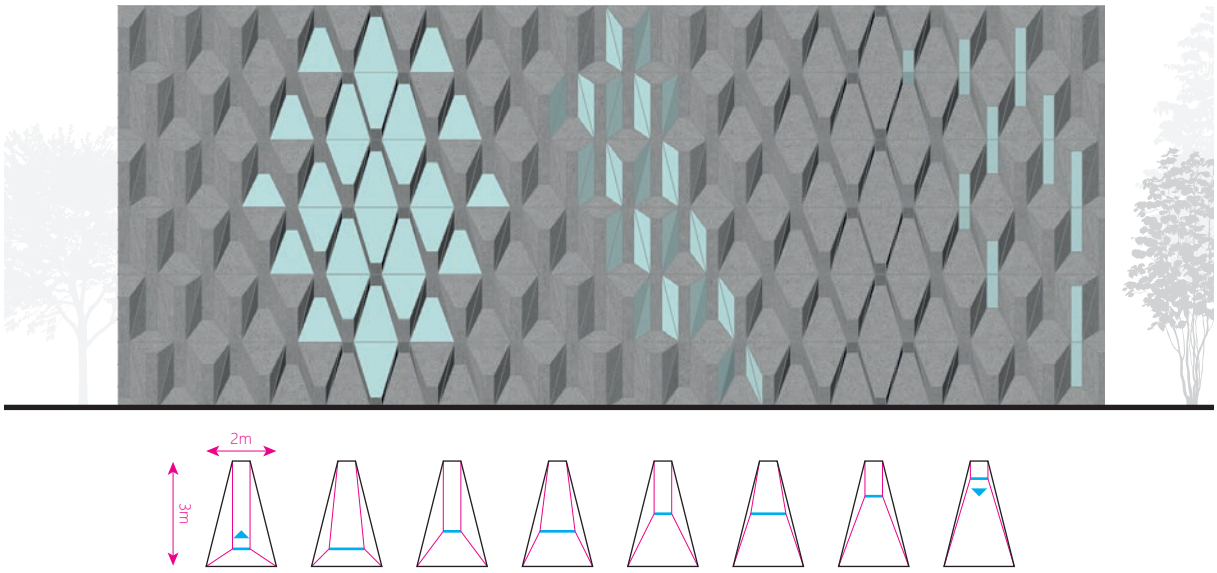


Abb. 1 - Ergebnis einer geometrischen Formstudie

filen, bestehend aus strukturierten Stegen und unstrukturierten Flanschbereichen. Die Stege wurden 3-lagig ausgeführt: Ein glattes Textil im Winkel von 45° für den Abtrag der Schubkräfte, welches auf beiden Seiten mit jeweils einem wölbstrukturierten Gitter eingefasst wurde (Abb. 2).

Zur ersten Abschätzung der Eignung wurden strukturierte Prüfmuster von der Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH im Labormaßstab gefertigt. Um die Tragfähigkeit der strukturierten Verbundmittel bewerten zu können, wurden zusätzlich Prüfmuster mit einem glatten Steg hergestellt. Die Verbundmittel wurden anschließend am Architektur-Institut Leipzig der HTWK Leipzig in zwei 40 x 40 cm große Betonschalen mit einer Stärke von 30 mm einbetoniert. Der lichte Abstand beider Schalen betrug 25 cm. Als Beton wurde ein hochfester Beton mit einer Prismendruckfestigkeit von durchschnittlich σ_{cm} = 100 N/mm² und einem Größtkorn von 2 mm verwendet. Dieser wurde im Zuge des C³Basisvorhabens 2 entwickelt.

BELASTUNGSVERSUCHE

Die Ermittlung der Tragfähigkeit der strukturierten Carbongitter erfolgte am Institut für Massivbau der RWTH Aachen. Dort wurden die glatten und strukturierten Verbundmittel mit jeweils drei Versuchskörper auf ihre Schub-, Zug- und Drucktragfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse zeigt Abb. 3.

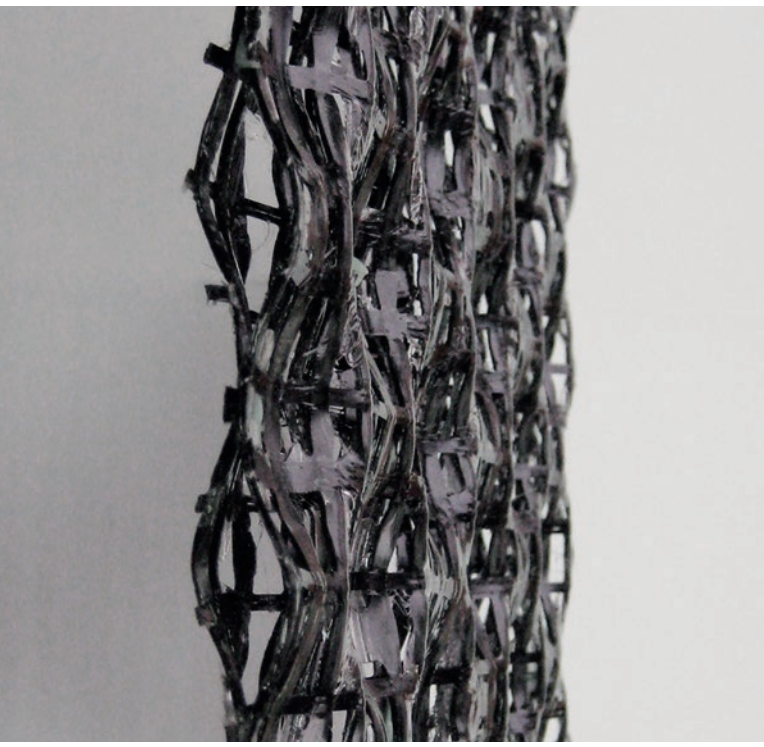


Abb. 2 - Wölbstrukturiertes Carbongelege

In Abb. 3 sind die Mittelwerte der Bruchkraft F_{mx} sowie die daraus abgeleiteten charakteristischen Werte F_{Rk} (5 % Fraktile) aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass die strukturierten Verbundmittel im Versuch ähnliche Bruchkräfte F_{mx} wie die geraden Verbundmittel erzielen. Betrachtet man nun die charakteristischen Bruchkräfte F_{Rk} der Schub und Druckversuche kann festgestellt werden, dass die geraden Verbundmittel große Streuungen aufzeigen, wodurch sich die charakteristische Bruchkraft stark verringert. Die wölbstrukturierten Verbundgitter weisen im Vergleich dazu wesentlich geringere Streuungen auf. Durch die Wölbstrukturierung des Materials konnte somit eine Steigerung der Druckfestigkeit um mehr als das Doppelte und der Schubsteifigkeit um ca. 40 % gegenüber einem vergleichbaren unstrukturierten Verbundmittel erzielt werden. Für die Druck- und Schubversuche konnte weiterhin beobachtet werden, dass die strukturierten Gitter im Vergleich zu geraden Gittern bei gleicher Kraft eine größere Verformung aufnehmen können. Um bei den Sandwichelementen nicht auf einen druckfesten Dämmstoff angewiesen zu sein, wurden alle Versuche ohne Dämmstoff durchgeführt.

DÄMMTECHNOLOGIE

Die schlanke Bauweise mit Carbonbeton legt nahe, auch bei der Dämmung ein sog. Superisolationsmaterial (Wärmeleitfähigkeit < 20 W/(m²K)) zu integrieren. Vor diesem Hintergrund wurde durch die Partner Solidian und EVONIK zusätzlich ein hochgedämmtes, zweidimensional gekrümmtes Sandwichelement mit 2 cm starkem Dämmkern aus CALOSTAT® entwickelt, einem mineralischen, temperaturstabilen, nicht brennbaren Dämmmaterial aus Siliciumdioxid in Platten- oder Granulatform. Mit diesem erreichte das Element einen U-Wert von U = 0,72 W/(m²K). Ein vergleichbares EPS-Element liegt bei U = 1,1 W/(m²K)[*1]. CALOSTAT® wurde darüber hinaus auch in den Sandwichelementen des ILEK verarbeitet.

[*1] Prüfbericht P5-265/2016
vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik

SCHALUNGSTECHNOLOGIE

Die Herstellung von doppelt gekrümmten Sandwichelementen mit verschiedenen Geometrien stellt hohe Ansprüche an die Schalung. Herkömmliche Schalungen aus Holz sind für solch architektonisch anspruchsvolle Fassaden aufgrund von Herstellung und Materialverbrauch sehr kostenintensiv und daher wenig praktikabel. Daher wurde auf die am ILEK erforschten Technologien der gefrorenen Sandschalung gesetzt. Das Prinzip der gefrorenen Sandschalung beruht darauf, dass feuchter Sand als Block gefroren und dann mittels Fräsen formgebend bearbeitet wird. Dabei werden zwei Schalungshälften hergestellt, die anschließend zusammengefügt und mit Beton vergossen werden. Beliebig gekrümmte Betonbauteile lassen sich damit ressourcenschonend herstellen.

Bei dieser Herstelltechnik bestand die Schwierigkeit somit nicht in der Formgebung, sondern dem Einfügen der textilen Bewehrung bzw. der textilen Verbundgitter und der genauen Positionierung der Betonimplantate. Die Betonimplantate, welche am ILEK entwickelt wurden, ermöglichen ein späteres Verbinden der einzelnen Sandwichelemente. Der Herstellungsprozess wurde abschließend anhand dreier Funktionsmuster erfolgreich erprobt. Dabei sollen durch die Demonstratoren die geometrischen Möglichkeiten der Schalungsmethode und die lagegenaue Positionierung der Implantate, der Schubverbundmittel und der textilen Bewehrung gezeigt werden:

1. Ein einschaliges, doppelt gekrümmtes Fassadenelement aus 3 Segmenten, die mittels Implantaten gefügt werden
2. Ein Regelflächen-Sandwich mit Kerndämmung und linearen Schubverbundmitteln
3. Ein doppelt gekrümmtes Sandwich mit punktuellen Schubverbundmitteln

AUSBLICK

Zukünftiger Forschungsbedarf besteht in Hinblick auf eine Umsetzung als Fassade darin, die entwickelten Technologien zu skalieren, in industrielle Prozesse einzubetten und weitere Standsicherheitsprüfungen vorzunehmen, um großformatige, frei geformte Sandwichelemente für individualisierte Fassaden herstellen zu können.

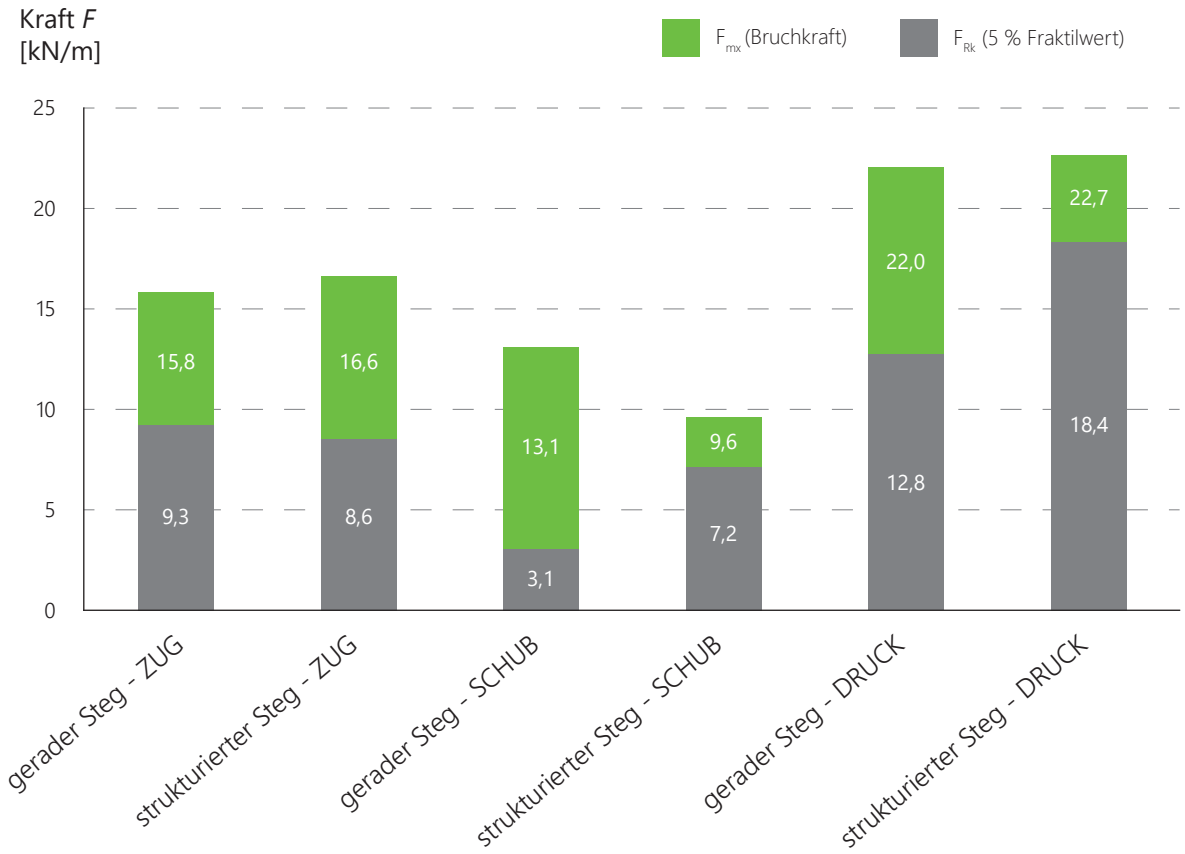


Abb. 3 - Ergebnisse der Belastungsversuche der Verbundgitter mit geradem und wölbstrukturiertem Steg

BETEILIGTE PARTNER

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Solare Optimierung & architektonische Konzepte

Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik
PV-Technologie & Integrationskonzepte

Solar Valley GmbH
Kombinationsmöglichkeiten & Lebensdauerbetrachtung

TU Dresden - Institut für Baustoffe
Betonmatrix & Betonage

C³PV

ENERGIE GEWINNEN - INTEGRATION VON PV

Im Teilprojekt C³PV sollte die Integration von Solarkomponenten in den Carbonbeton untersucht werden, um einen energetischen Mehrwert insbesondere für Gebäude mit großen Fassadenflächen zu ermöglichen. Ziel war es dabei, die Strom erzeugende Photovoltaik-Komponente (= PV-Komponente) solar optimiert und ästhetisch hochwertig zu integrieren. Dazu wurde untersucht, welche technischen Konzepte, Materialien und Prozesse zur Erreichung dieses Ziels notwendig sind. Denn integrale, solar optimierte Entwürfe für PV-Fassaden können neue Wege in Richtung nachhaltiges und ästhetisches Bauen aufzeigen und dazu beitragen, die Akzeptanz sowie im nächsten Schritt den baulichen Anteil von PV-integrierten Fassaden zu erhöhen.

SOLARE OPTIMIERUNG

PV-Komponenten sind in städtischen Fassaden üblicherweise nicht optimal für die Energiegewinnung ausgerichtet, da sie zum einen nicht immer auf der Südseite, zum anderen meist vertikal und planar montiert sind. Hinzu kommen Verschattungen durch Nachbargebäude oder Bäume. Die im Basisvorhaben 4 verfolgten Fassadenansätze in Carbonbeton sollten zusätzlich zur planaren Integration von PV-Komponenten Geometrien mit dreidimensionalen Flächen für solar optimierte Gebäudehüllen ermöglichen. Zur Entwicklung solcher optimierten Fassaden wurden parametrische Software-Tools eingesetzt, die auf Grundlage verschiedener Ausgangsparameter wie der Orientierung der Fassade, Modulgeometrien oder Wetterdaten den Fassadenentwurf hinsichtlich der solaren Erträge optimieren. So können durch Krümmungen, Faltungen oder Eindrehungen der PV-Flächen die solaren Gewinne ohne Nachführung maximiert werden (Abb. 1). In der Simulation wurden beispielsweise für eine optimiert gefaltete Fassade 60 % mehr solare Erträge erreicht als bei der planaren Referenzfassade. Diese und andere vielversprechende Formansätze wurden in Kombination mit den PV-Komponenten als Demonstratoren umgesetzt.

PV-TECHNOLOGIEN

Die Entwicklung der Carbonbetonfassaden mit integrierten PV-Modulen erfolgte in zwei Richtungen: Zum einen wurden die PV-Module dauerhaft mit der Fassade verbunden (einbetoniert), zum anderen wurden PV-Komponente und Fassadenoberfläche so gestaltet, dass ein Austausch der Module möglich ist. Die direkte Verbindung mit der Fassade liefert das ästhetischste Ergebnis, da keine Fugen entstehen und ein nahezu perfekt bündiger Abschluss erzielt werden kann. Austauschbare Module sind von Vorteil, da im Schadensfall nur das Solarmodul, nicht aber das ganze Fassadenelement ausgetauscht werden kann. Außerdem kann eine lösbare Verbindung besser thermomechanische Spannungen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Betonelement und Solarmodul aufnehmen.

Für die Solarmodule wurden Rückkontaktzellen mit homogener dunkelblauer bis schwarzer Frontseite, aber auch Standardzellen mit einem sogenannten H-Grid mit feinen Silberlinien verwendet. Die Rückkontaktzellen sind ästhetisch ansprechender und besitzen in der Gruppe der kommerziell verfügba-

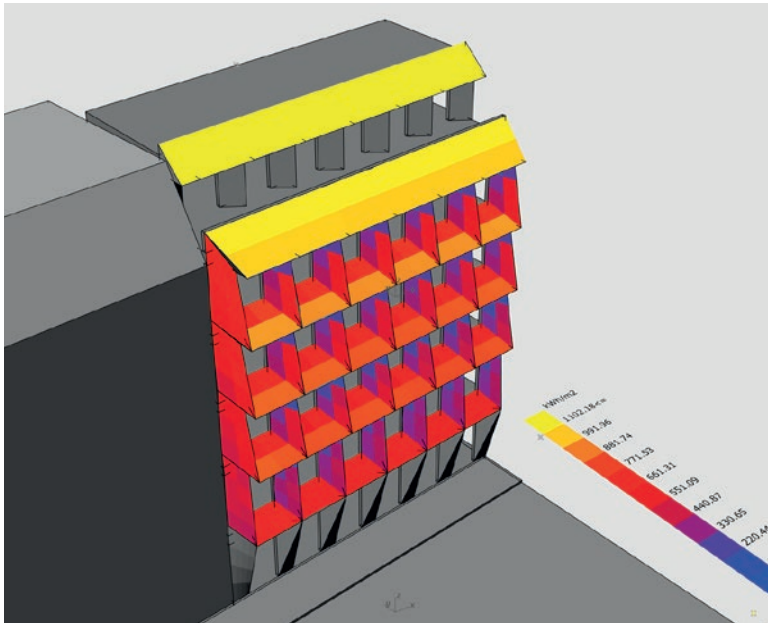


Abb. 1 - Simulation einer solar optimierten Fassade

ren Zellen den höchsten Wirkungsgrad. Allerdings werden diese aktuell nur von einer Firma (SunPower GmbH) angeboten. Demgegenüber sind die Standardzellen jederzeit von vielen Anbietern verfügbar.

Bei Einkapselungsmaterialien bzw. Lamination der Solarzellen kommen sowohl der Standardaufbau mit Glas/ Ethylenvinylacetat (EVA)/ Zelle/ EVA/ Rückseitenfolie als auch neuartige Materialien mit reinem Kunststoffaufbau zum Einsatz. Reine Kunststoffmodule sind deutlich leichter und unterstützen damit den Gedanken der leichteren Fassade. Solche Technologien können auch auf andere Einsatzgebiete mit einem Bedarf an Gewichtsreduktion übertragen werden.

Die Verschaltung der Module erfolgte sowohl innerhalb des Betons als auch auf dem Textil mit Anschlussdosen, wie sie in Standard-Solarmodulen Verwendung finden. Für diese wurden Aussparungen im Beton vorgesehen.

BETONAGE

Bei der Herstellung von Carbonbetonfassaden mit einbetonierten PV-Modulen wurden die Module mit der Glasabdeckung auf die in diesem Bereich ebene Betonform aufgelegt und gegen Verschieben und Unterlaufen durch den Beton gesichert. Das Backsheet und die Kontaktierung des PV-Moduls ragen in die Form hinein. Danach wird die Carbonbewehrung (Gitterstruktur) in die Form eingelegt und gegen Aufschwimmen im Frischbeton gesichert. Die Backsheets der PV-Module können dabei als Abstandhalter gegen die Sichtseite des Betons genutzt werden. Danach werden die PV-Module durch konventionelle Aderleitungen aus Kupfer elektrisch miteinander verschaltet und die Anschlussleitungen aus der künftigen Fassadenrückseite herausgeführt. Die ursprüngliche Idee, die elektrische Leitfähigkeit der Carbonbewehrung zur Ableitung der elektrischen Energie aus den PV-Modulen zu nutzen, wurde im Laufe der Arbeiten verworfen. Sowohl der elektrische Widerstand als auch die Kontaktierung auf das Carbon waren

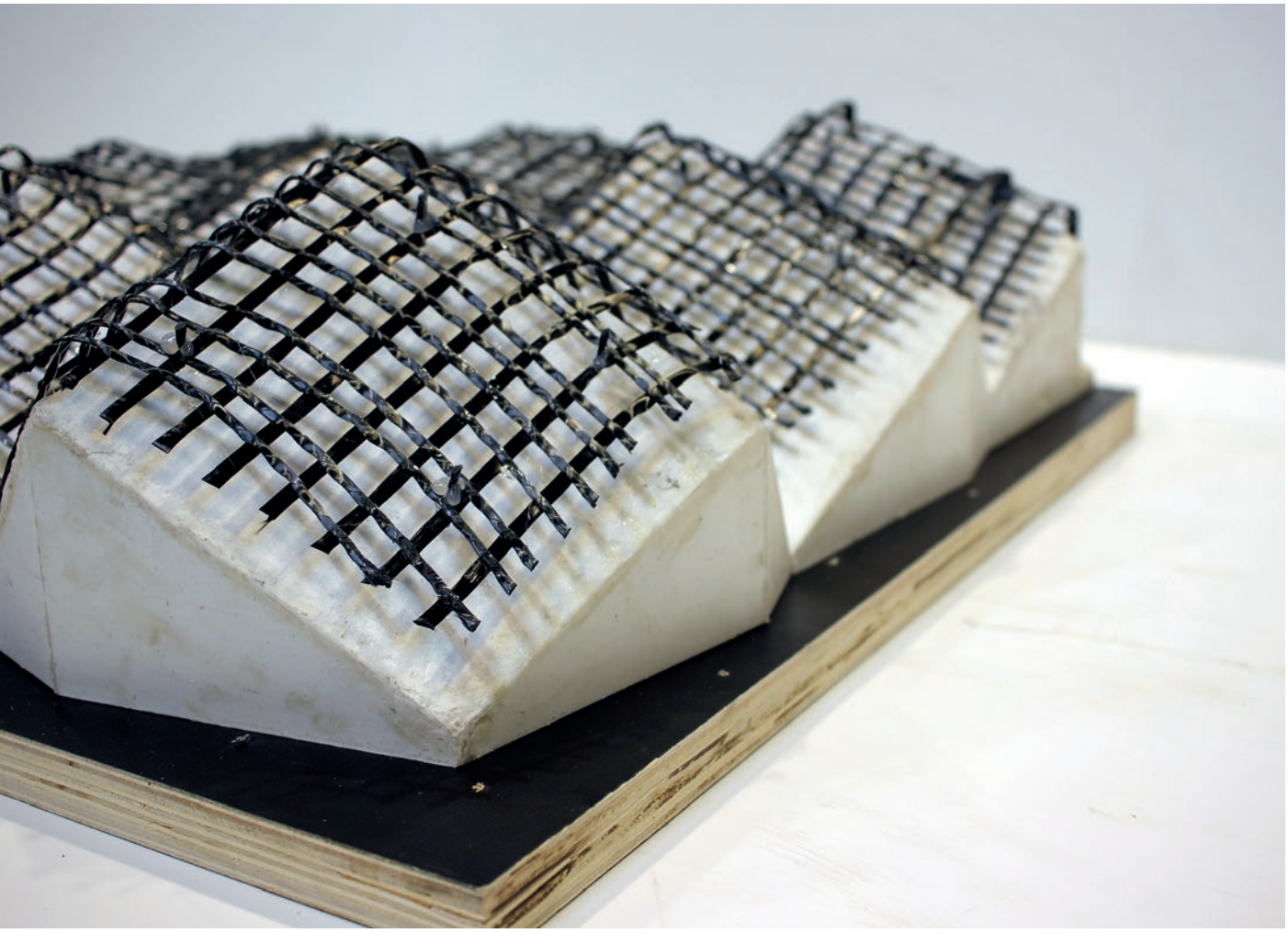


Abb. 2 - Silikonmatrize & vorgeformtes Bewehrungstextil

unzulänglich. Jedoch ist eine Funktionalisierung der Bewehrung durch zusätzlich integrierte elektrische Leiter zu untersuchen.

Bei der Betonage der revisionierbaren PV werden die Module entsprechend erst nach der Fertigung der Betonfassade eingebaut. Auf der Sichtseite der Fassade waren daher Vertiefungen vorzusehen, in welche die PV-Module passgenau eingesetzt und z. B. verschraubt werden können. Im Beton müssen entsprechende Ankermuttern oder ähnliche Befestigungselemente vorgesehen werden. Für eine Fertigung der Carbonbetonfassaden in größerem Maßstab bietet sich der Einsatz von Strukturmatrizen an, in denen die Vertiefungen für die PV-Module, die Haltorgane für die Elementbefestigungen sowie Durchbrüche für die Anschlussleitungen ausgeformt sind (Abb. 2).

Das Betonieren erfolgt mit einem fließfähigen Feinkornbeton (Durchmesser bis 5 mm). Durch die granulometrische Optimierung hat der Beton einen geringen Wasseranspruch und damit auch bei geringen Wasser-Zement-Werten ein sehr gutes Fließ- und Entlüftungsverhalten. Bei beiden Typen wurde die sichere Befestigung der PV-Module in der Fassaden durch Belastungstests nachgewiesen: In beiden Fällen begann die Ablösung der PV-Module von der Fassaden erst nach dem Auftreten struktureller Schädigungen am Körper der PV-Module. Die Bruchkräfte lagen weit über den infolge Windlasten auftretenden Sogkräften.

DEMONSTRATOREN

Die hergestellten Demonstratoren von C³PV zeigen die vielfältigen Möglichkeiten einer PV-Integration in die Sichtbetonfassade. Durch Anpassen der Fassadengeometrie kann zudem eine Optimierung der solaren Erträge erreicht werden. Mit diesen und ähnlichen Ansätzen entsteht eine neue Generation von Solarfassaden, welche Ästhetik und Effizienz miteinander vereint (Abb. 3).

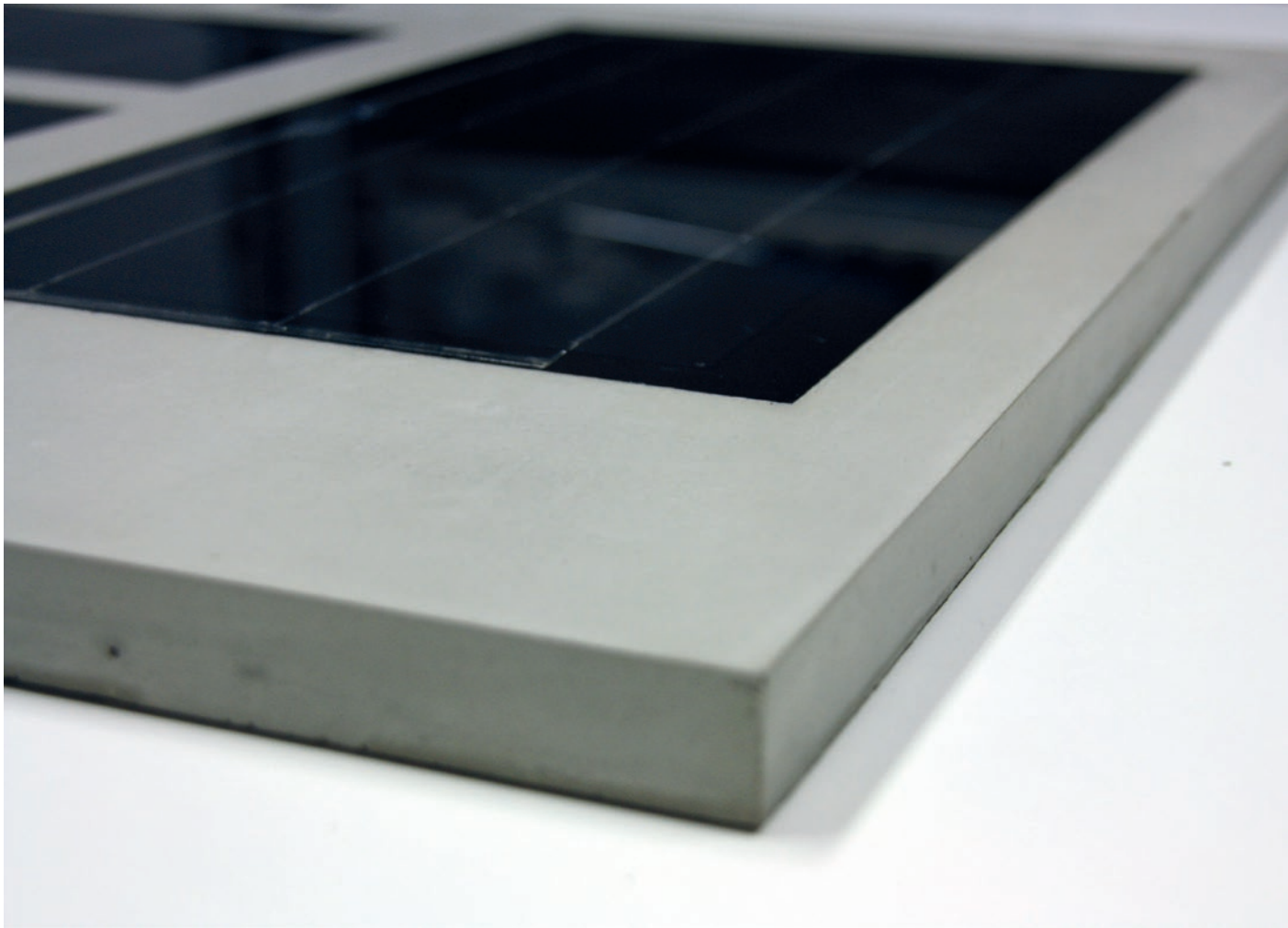


Abb. 3 - Oberflächenbündig integrierte PV-Elemente im Carbonbeton

BETEILIGTE PARTNER

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Architektonische Konzepte & konstruktive Lösungsansätze

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften
Weiterentwicklung & Herstellung von Kondensatorfolien

Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.
Weiterentwicklung & Herstellung von Kondensatortextilien

C³SUPERCON
ENERGIE SPEICHERN

Im Rahmen des Teilvorhabens C³SuperCon entwickelte das Interdisziplinäre Zentrum für Materialforschung (IZM) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zusammen mit dem Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V. (TITV) effektive Energiespeicherelemente für die vom Architektur-Institut Leipzig (ai:L) konzipierte Carbonbeton-Gebäudehülle. Ziel war es, ein möglichst dünnes, formbares und robustes Superkondensatorelement mit hoher Speicherdichte auf der Basis von Nanokompositmaterialien als Dielektrika zu realisieren.

SPEICHERTECHNOLOGIE & -HERSTELLUNG

Die Wahl der Energiespeichertechnologie fiel auf Kondensatoren, da diese, anders als elektrochemische Speicher (Batterien), elektrische Energie direkt und ohne weitere Umwandlung speichern. Das führt zu den spezifischen Vorteilen von Kondensatoren, insbesondere der schnellen Energieaufnahme und -abgabe sowie einer äußerst hohen Zyklenfestigkeit und somit geringem Wartungsaufwand, was für den Einsatz in der Gebäudehülle einen bedeutenden Aspekt darstellt. Hinzu kommt eine sehr viel größere Temperaturfestigkeit als elektrochemische Speicher. Dem gegenüber steht eine geringere Energiespeicherdichte und hohe Selbstentladungsraten von Kondensatoren.

Die aus der eigenen Syntheselinie im Labormaßstab hergestellten Nanokomposit-Dielektrika bestehen aus Nanometer großen Bariumtitanat-Partikeln, die homogen in einem Polymer verteilt sind. Dadurch werden die guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Konstituenten vereint. Dadurch ist das Komposit beispielsweise ähnlich mechanisch flexibel und besitzt eine vergleichbare elektrische Durchschlagfestigkeit wie reines Polymer, erlangt aber durch die Keramikzugabe eine höhere Permittivität und damit eine höhere Energiedichte. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Kapazität mit der Fläche skaliert und mit der aktuellen Laboranlage (Abb. 1) auf der jetzigen Stufe der Technologieentwicklung nur Flächen von einigen 10 cm² realisiert werden können. Die weitere Entwicklung der Dünnfilmproduktion wird Foliengrößen weitaus über m²–Flächen erlauben und damit eine deutliche Steigerung der Kapazität über die Labormuster hinaus ergeben. Für die Herstellung der Kompositschichten wird das Polymer gelöst, mit den synthetisierten Bariumtitanat-Partikeln vermischt und in Form einer Suspension über ein Rakelverfahren auf eine Trägerfolie aufgebracht (Abb. 2), die danach einen Trocknungsprozess durchläuft. Dadurch werden homogene Schichten mit wenigen Mikrometern Dicke produziert (Abb. 3). Diese werden anschließend zu Kondensatorfolien metallisiert.

Mittels optischer und elektrischer Charakterisierung der Nanokomposit-Kondensatoren wurden Variationen der Materialsynthese und Schichtherstellung bewertet und für eine Optimierung der

Abb. 1 - Linearbeschichtungsanlage

dielektrischen Parameter der Speicherfolien entsprechend weiterentwickelt. So konnte durch Anpassung der Trocknungsparameter und der Ausgangsstoffe für die Bariumtitanat-Synthese die Durchbruchspannung, die Permittivität, die Energiedichte und die Speicherzeit/Leckströme der finalen Kondensatorfolien deutlich optimiert werden. Es stellte sich heraus, dass eine Erhöhung der Bariumtitanat-Konzentration die Energiedichte des Kondensators erhöht, jedoch auch dessen Selbstentladungsrate. Der beste Kompromiss in Hinblick auf Durchschlagfestigkeit, Energiedichte und elektrische Leitfähigkeit ergibt sich zur Zeit für ein Kompositmaterial mit 10 Vol.-% $BaTiO_3$, wobei das Bariumtitanat über eine Mischoxidsynthese hergestellt wurde. Die Durchschlagfeldstärke liegt bei 250 MV/m, die Energiedichte bei ca. 1 MJ/m³ bei einer Feldstärke von 80 MV/m, was einer Klemmenspannung von 1000 V entspricht. Bei dieser Feldstärke beträgt die elektrische Leitfähigkeit 0,4 nS/m. Die weitere Senkung der elektrischen Leitfähigkeit stellt derzeit noch eine Hürde dar, die u. a. mit dem Wechsel des Matrixmaterials genommen werden soll. Die Speicherfolienkapazitäten, die im Labormaßstab gefertigt werden, dienen der Untersuchung der Materialeigenschaften und zum Testen der elektrischen Daten, erlauben aber kaum eine praktische Anwendung. Dafür sind industrielle Fertigungsverfahren im großen Maßstab notwendig.

INTEGRATION IN TEXTILE STRUKTUREN

Am TITV Greiz wurden textile Basisstrukturen auf ihre Eignung für die Integration von elektrischen Speichermedien untersucht. Dabei wurden metallisierte Polyamide als leitfähige Monofilamente zusammen mit isolierenden Polyestermonofilamenten in einem Gewebe verarbeitet. Die lediglich 50 µm dicken Monofilamente wurden dabei webtechnisch zu einer sehr dünnen und flexiblen Interdigitalstruktur verarbeitet, indem ein abwechselnder Schusseintrag aus leitfähigen und isolierenden Monofilamenten erfolgte, welcher mit leitfähigen Kettfäden im Randbereich kontaktiert wurde. Zudem wurde eine Technologie getestet, welche

Abb. 2 - Rakelbeschichtung von Kondensatorfolien

potentiell störende Kurzschlüsse zwischen beiden Seiten der Interdigitalstruktur entfernt. Die entstandenen Kondensator-Textilien konnten anschließend elektrisch vermessen und eine Verbesserung der Energiespeicherung durch Beschichtung der textilen Fläche mit verschiedenen Dielektrika erreicht werden. Parallel wurden Konzepte zum Schutz der leitfähigen Textilien entwickelt, welche vor allem auf Basis einer Barrierefolie umgesetzt wurden.

INTEGRATION IN DIE GEBÄUDEHÜLLE

Für SuperCon-Wandaufbauten wurde eine Speicherintegration im Wandquerschnitt sowohl raumseitig, als auch - aufgrund von Temperaturunempfindlichkeit des Speichers - außenseitig untersucht. Als potentielle Einsatzgebiete wurden Gebäude mit geringem Energiebedarf wie Null- und Plusenergiegebäude identifiziert, welche die selbst erzeugte Energie kurzzeitig speichern und sie später verbrauchen können. Dabei spielen Speicherkapazität, Zyklenfestigkeit, Ladezeiten und Langlebigkeit eine zentrale Rolle. Zudem sind Fragestellungen nach Sicherheit, Speichermanagement und elektrotechnischer Infrastruktur zu klären.

Zukünftige Produktionsmöglichkeiten großflächiger Kondensatorfolien lassen eine direkte Integration einer dünnen Energiespeicherfolie mit den gegenwärtig verfügbaren Materialien als noch nicht praktikabel erscheinen. Eine sinnvolle Speicherdichte wird nur mit hohen Klemmspannungen zu realisieren sein, was auch Sicherheitsfragen aufwirft. Im Niederspannungsbereich wird der Flächenbedarf mit dem aktuellen Stand der Technik unrealistisch hoch, selbst bei Vielschichtkondensatoren. Der Vergleich zwischen Batterie- und Kondensatorspeicherung zeigt, dass letztere nur für eine Kurzzeitspeicherung aufgrund des Selbstentladeverhaltens in Frage kommen. Möglich erscheint die tageweise Speicherung, was aber in der weiteren Materialentwicklung noch zu zeigen ist. Die faszinierende Vorstellung einer fassadenintegrierten Speicherfolie kann mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten noch nicht realisiert werden.

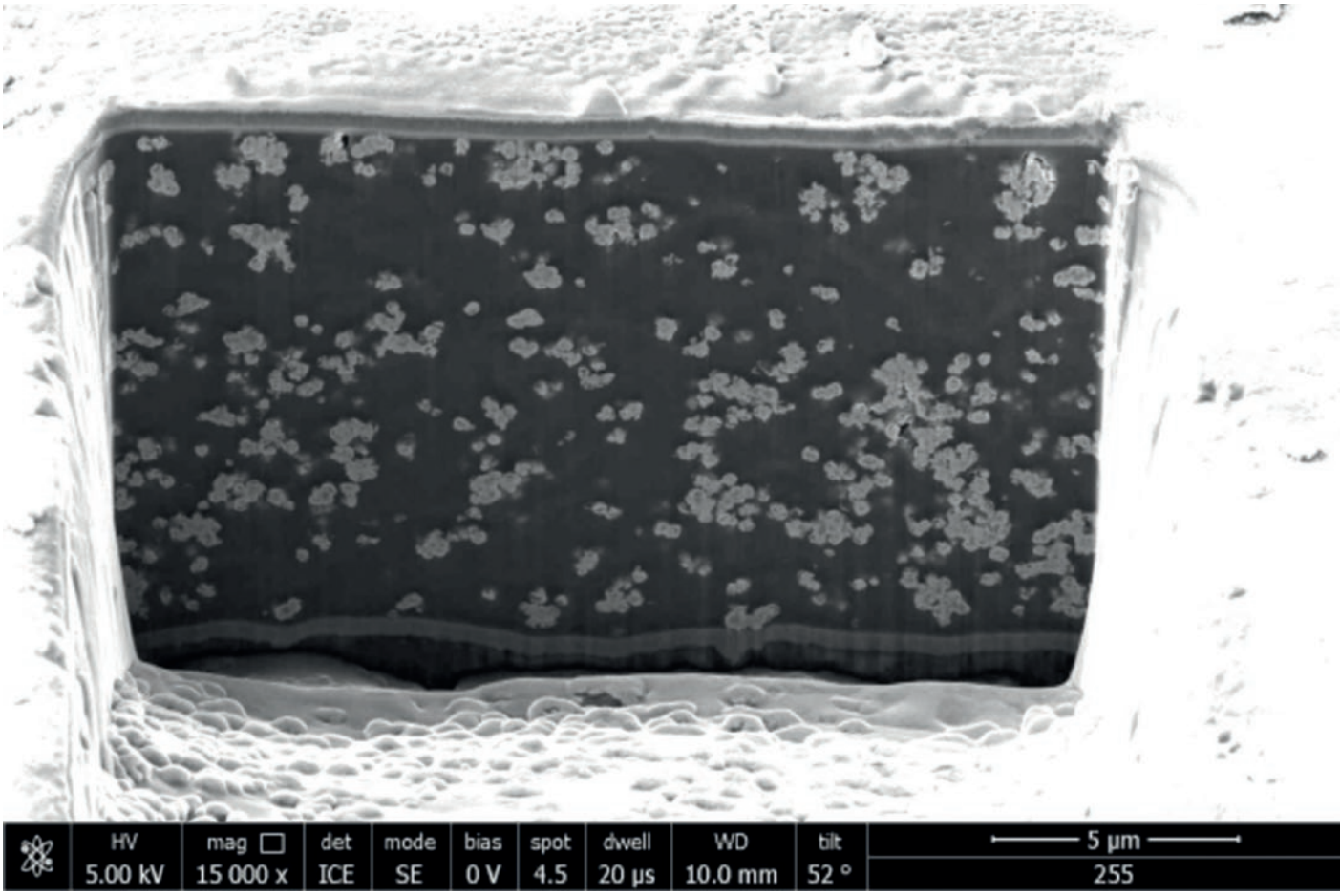


Abb. 3 - Querschnittaufnahme einer Kondensatorfolie mit annähernd homogener Verteilung der Keramikpartikel

BETEILIGTE PARTNER

HFB Engineering GmbH
Betonmatrix & Schalungstechnologie

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Architektonische Konzepte & baupysikalische Bewertung

Stäubli Bayreuth GmbH
Textiles Fertigungsverfahren

TU Dresden - Institut für Textilmaschinen & textile Hochleistungswerkstoffe
Textiltechnischen Lösungsvarianten & Materialuntersuchungen

Vosla GmbH
Lichttechnische Bewertung

C³DAYLIGHT

TAGESLICHTNUTZUNG MITTELS LICHTLEITENDER FASERN

Das Teilvorhaben C³Daylight widmete sich der Integration von Lichtwellenleitern in eine mehrschichtige, wärmegedämmte Carbonbeton-Fassade. Damit soll die Qualität von Raumausleuchtungen zukünftig verbessert, Energieaufwendungen für Kunstlicht reduziert und neue Gestaltungsoptionen für Sichtbeton-Fassaden eröffnet werden. Für die Realisierung der transluzenten Fassade wurde ein textilbasiertes Verfahren entwickelt, mit dem sich eine homogene Lichtdurchlässigkeit, ein geeigneter Dämmungseintrag sowie eine simultane und lastgerechte Integration von Carbonbewehrungsstrukturen realisieren lassen. Für die Herstellung der Fassade im industriellen Maßstab wurde dieses Verfahren gezielt auf eine möglichst automatisierbare Umsetzung angepasst.

LICHTLEITERTEXTIL

Als Basis für eine automatisiert hergestellte transluzente Carbonbeton-Fassade diente die Abstandsgewebeherstellung durch die bei der Stäubli Bayreuth GmbH verfügbaren Doppelgreifer-Webtechnik. Diese Textiltechnik ermöglicht eine hohe Strukturvariabilität der Deckflächen und prinzipiell maschinen- sowie bindungstechnisch eine sehr hohe Abstandseinstellung (über 100 mm), mit der sich die Entwicklung von hochdämmenden Fassaden realisieren lassen. Im Vordergrund der Entwicklungsarbeiten des Instituts für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) und der Stäubli Bayreuth GmbH stand eine homogene Lichtdurchlässigkeit der Carbonbeton-Fassade, welche durch eine gleichmäßige sowie automatisierte Einarbeitung und bindungstechnische Ankopplung der Lichtwellenleiter (Abb. 1) in die Abstandsgewebe erreicht werden sollte. Für diesen Zweck erfolgte eine Bewertung geeigneter lichtleitender Fasermaterialien hinsichtlich der Lichtleiteigenschaften, chemischen Beständigkeit, textilen Verarbeitbarkeit und Kosten. Auf dieser Grundlage wurden PMMA-basierte Fasern für die Verwendung in der transluzenten Carbonbeton-Fassade ausgewählt und im Demonstratorbauteil verwendet. Die Dämmung ist für ein anforderungsgerechtes Fassadenelement unerlässlich. Daher wurde die Abstandsgestaltung der Gewebe für einen geeigneten Dämmeintrag untersucht sowie geeignete Varianten ausgewählt und in einem hochskalierbaren Maßstab mittels der Doppelgreifer-Webtechnik umgesetzt (Abb. 2). Zudem wurden Varianten zur simultanen und lastgerechten Integration von Carbon-Verstärkungsstrukturen in der Fassade entwickelt, mit der sich eine Bewehrung der transluzenten Fassaden prinzipiell realisieren lässt.

BETONAGE

Für die Betonage des erstellten Lichtleitertextils wurden zwei prinzipielle Technologien erprobt: das Betonieren in einer liegenden bzw. in einer stehenden Schalung. Vorteile der stehenden Schalung bestehen in der Möglichkeit der weitgehend

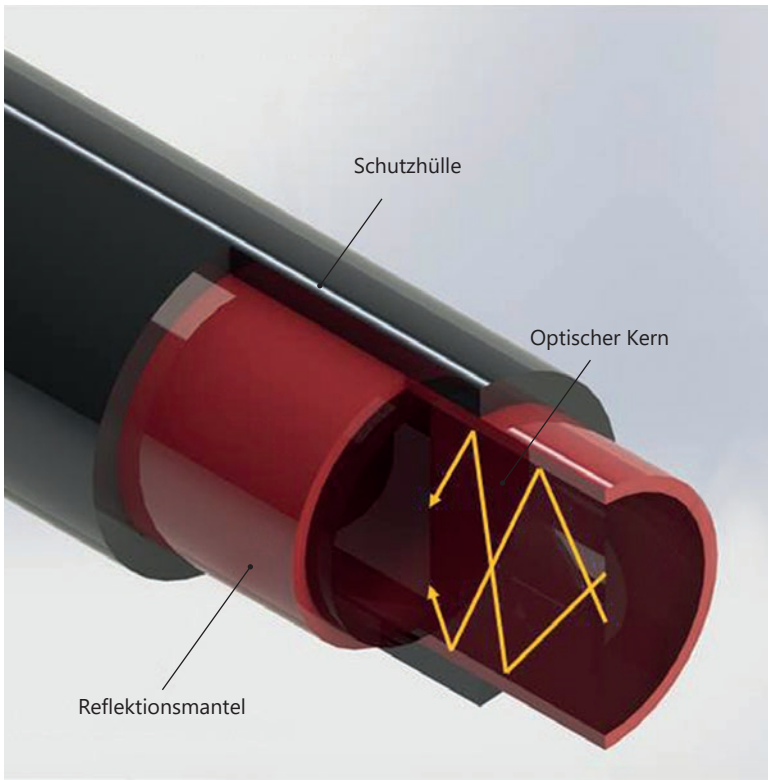


Abb. 1 - Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters

gesicherten Positionierung der stabilen Gewebehülle (standsicheres Gewebe mit Dämmung und integrierten Lichtleitern) und das Betonieren in einem technologischen Schritt. Ein Nachteil besteht darin, dass im Verlauf des Verdichtungsprozesses Matrix unter die in der Schalung stehende Gewebehülle läuft, auf das Gewebe durch die Matrix ein Seitendruck entsteht und so das Abstandsgewebe eingedrückt wird. Das Betonieren in einer liegenden Schalung erfordert dagegen aufwändigere Maßnahmen zur Lagesicherung des Gewebekörpers (Sicherung gegen Durchbiegung der Gewebeoberfläche, Gewährleistung einer einheitlichen Betondeckung, Vermeiden des Aufschwimmens während der Betonage), die Betonage der Betonaußenseiten erfolgt dabei innerhalb von zwei technologischen Einzelschritten. Als geeignete Matrixvarianten wurden eine herkömmliche Feinbetonmatrix und eine im C^3Basisvorhaben 2 erarbeitete Rezeptur bewertet, jeweils anwendbar in den beschriebenen Technologien. Zur Ausdämmung der bereitgestellten Gewebekörper mit integrierter Lichtleitung gelangten verschiedene Schüttdämmstoffe (Blähglas- und CALOSTAT®-Schüttung) zum Einsatz. Das Einbringen und insbesondere der dauerhafte Verbleib dieses Schüttdämmstoffes innerhalb der Gewebehülle stellten hohe Anforderungen an die Vorfertigung dieser Gewebehülle mit den bereits webtechnisch integrierten Lichtleitern.

LICHTTECHNISCHE BEWERTUNG

Um zu ermitteln, mit welchem Lichtleiteranteil eine konkrete Verbesserung der Raumausleuchtung erreicht werden kann, wurde eine lichttechnische Bewertung an Mustern mit unterschiedlicher Leuchtpunktdichte und -dicke vorgenommen (Abb. 3). Diese ergab, dass mit zunehmendem Flächenanteil der Lichtleiter der Transmissionsgrad durch den Beton steigt. Zudem wurde der Wirkungsgrad der Fasern ermittelt: Dieser ist am größten, je kleiner der

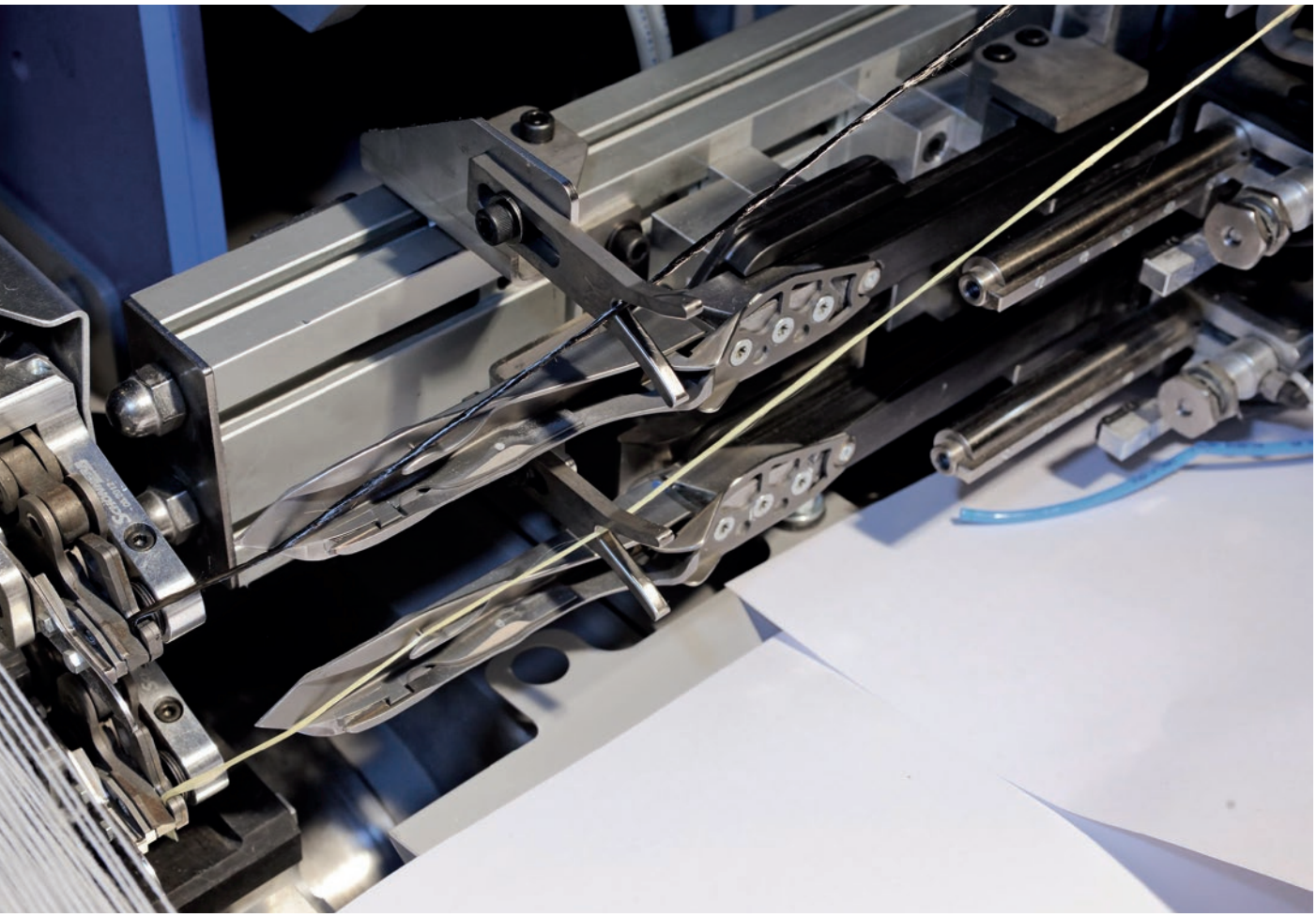


Abb. 2 - Detail einer Doppelgreifer-Webmaschine

Mantelflächenanteil pro Lichtleiter-Querschnittsfläche ist. Hinsichtlich einer maximalen Lichtausbeute ist es damit vorteilhafter, bei gleichem Lichtleiteranteil wenige große Querschnitte anstatt vieler kleiner zu integrieren. Die Wirkungsgrade der Gesamtproben ergaben, dass ein Prüfkörper mit einem Flächenverhältnis Lichtleiter/Beton = 5 % eine Beleuchtungsstärke von 125 lux ermöglicht. Die Beleuchtung eines Schreibtischarbeitsplatzes liegt bei 300 - 500 lux. Damit konnte gezeigt werden, dass die Lösungsansätze im C³Daylight beleuchtungstechnische Relevanz besitzen.

ANWENDUNGSFELDER

Für den Einsatz als nichttragende Gebäudehülle wurden für die C³Daylight-Fassade verschiedene Systemaufbauvarianten sowie konkrete Einsatzpotentiale herausgearbeitet. Diese werden in Büro-, und Bildungs-, Event-, Kultur- und Sakralbauten sowie in Einfamilienhäusern gesehen. Dabei könnte die nichttragende Daylight-Fassade sowohl in der gesamten, als auch in Teilen der Gebäudehülle eingesetzt werden und dort Licht- und Gestaltungsakzente setzen, welche die Tageslichtausleuchtung des Innenraums unterstützen.

DEMONSTRATOREN

Die hergestellten Demonstratoren belegen die grundsätzliche Machbarkeit des Ansatzes und stellen eine gute Basis für eine Produktentwicklung dar. Für eine industrielle und großserientaugliche Fertigung solcher transluzenter Fassadenelemente müssen vor allem Weiterentwicklungen zur Abstandserhöhung erfolgen, damit der Dämmkern größer und eine hochdämmbare Fassade möglich ist. Zudem sind Entwicklungen zur Setzung der Lichtpunkte durch zuführen, sodass zukünftig höhere Gestaltungsmöglichkeiten der Fassaden, z. B. durch Schriftzüge, Lichtflächen und Muster, möglich sind.

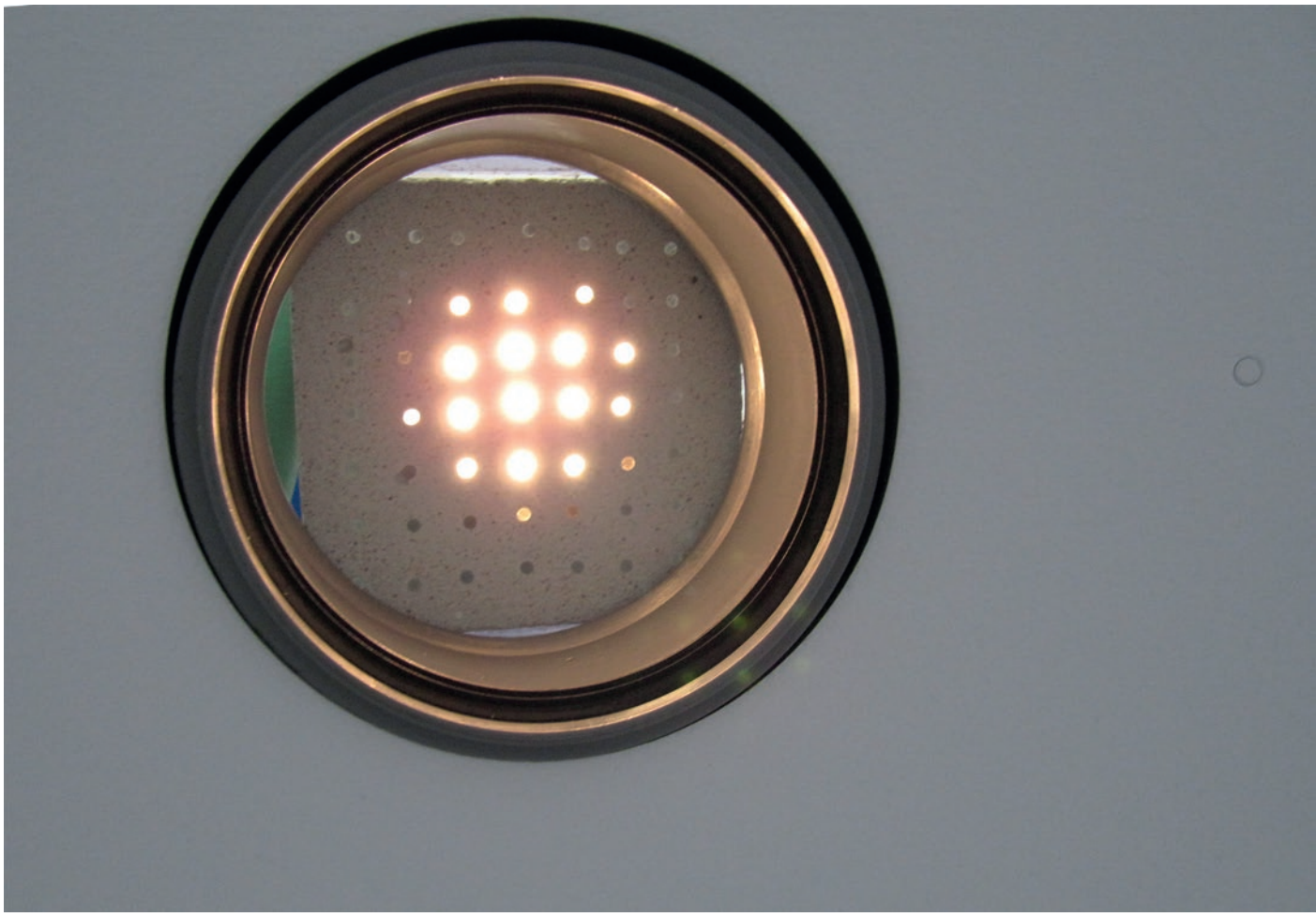


Abb. 3 - Lichttechnische Bewertung eines Probekörpers

BETEILIGTE PARTNER

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Architektonische Planung & Anwendungskonzepte

Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.
Textiltechnik & Fertigung LED-Gelege-Komposit

TU Dresden - Institut für Baustoffe
Betonmatrix & Schalungstechnologie

Vosla GmbH
LED-Technologie & Untersuchung zu Lichttransmission

C³LED
INTEGRATION VON LEUCHTDIODEN

Das Teilvorhaben C³LED hatte die Integration von Leuchtdioden (LED) in den Carbonbeton zum Ziel, um Sichtbetonelemente realisieren zu können, welche LEDs in flächiger oder punktueller Anordnung bereits „an Bord" haben. Diese können in Wandlösungen, Beplankungen oder Möbeln im Innen- und Außenbereich für dynamische Datenausgaben (Zeit-, Temperatur- & Datumsanzeigen, veränderliche Bildinformationen), Wand- bzw. bodenintegrierte Anzeigebereiche, LED-Wände und -Decken, Gebäudeinszenierung und -navigation sowie für den Einsatz in der Signaletik gezielt angesteuert werden.

In der Forschungsarbeit wurden dafür verschiedene Integrationsformen und -weisen der LED-Komponente entwickelt, wobei Schutz und Kontaktierung der LEDs sowie die Fertigungstechniken wichtige Schwerpunkte bildeten. Auch das Thema der Revisionierbarkeit der integrierten LEDs wurde erörtert und verschiedene Lösungsvarianten entwickelt, die ein Austauschen der Leuchtkomponente im Carbonbeton erlauben: Zum einen wurde eine Magnetverbindung zwischen LED und Leiterbahn umgesetzt, zum anderen oberflächennah transluzente textilummantelte Silikonschläuche in den Beton integriert, in denen fadenförmige Leuchtkörper eingefädelt und jederzeit wieder revisioniert werden können. Die textile Bewehrung des Carbonbetons wurde zur bauteilintegrierten Leitungsführung genutzt.

LED-TEXTILIEN

Um LEDs funktionsgerecht mittels textiler Trägermaterialien in den Beton zu integrieren, wurden zunächst verschiedene textile Strukturen einbetoniert um herauszufinden, welche grundsätzlich für die LED-Integration in den Carbonbeton geeignet sind. Dazu gehörten isolierte und unisolierte elektrisch leitfähige Faden- und Drahtmaterialien sowie Bänder, Gewebe, sticktechnisch verarbeitbare Flexsubstrate (FSD™-Technologie) und Gewirke, in welche die Spezialfäden und Drähte zur Kontaktierung der LEDs eingearbeitet waren (Abb. 1). Die Proben wurden anschließend bezüglich Handling während des Betonierprozesses, Stabilität der textilen Struktur und chemische Veränderung der elektrisch leitfähigen Materialien im Beton ausgewertet. Positiv bewertete textile Strukturen wurden schließlich mit LEDs bestückt, nach Möglichkeiten mit den Bewehrungen verknüpft und erneut betoniert. Je nach vorher festgelegter Designvariante lagen die Leuchttextilien dabei direkt auf Höhe der Bewehrung, bündig mit oder sogar leicht außerhalb der Betonoberfläche. Parallel wurden verschiedene Konzepte zum Schutz, zu unterschiedlichen Kontaktierungs- und damit verbunden auch Revisionierungsmöglichkeiten der Bauteile entwickelt.

Abb. 1 - LED-Pixelfeld mit aufgestickten Leiterbahnen

INTEGRATIONSVARIANTEN

Neben den Ansätzen, die LEDs im Beton auszusparen, wurde die generelle Möglichkeit untersucht, LED-Lichtquellen in Sichtbetonelemente zu integrieren, ohne dabei die Oberflächeneigenschaften hinsichtlich visueller Erscheinung zu beeinflussen. Dazu wurde das Transmissionsverhalten des emittierten Lichts anhand dünner Betonschliffe ermittelt, um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Betondeckung noch genügend Emission und somit wahrnehmbare Leuchtdichte an der Oberfläche gewährleistet. Ausgehend davon konnten Betonierversuche durchgeführt werden, bei denen LED-Elemente ca. 1,0 mm unter der Sichtbetonoberfläche auf textilen Bewehrungsgelegen platziert wurden. Ohne Beeinflussung der Sichtbetonqualität im ausgeschalteten Zustand ist bei Betrieb der LEDs ein Leuchten durch den Beton gut sichtbar (Abb. 2).

Weiterhin wurde die wellenlängendispersive Abhängigkeit der Lichttransmission in Beton untersucht. Es galt dabei, mögliche Bereiche des sichtbaren Spektrums zu finden, bei denen Beton eine besonders große Lichtdurchlässigkeit zeigt und die somit z. B. für Applikationen in der Signaletik sinnvoll sind. In einer Applikationstiefe von 1 mm unter der Betonoberfläche haben Wellenlängen zwischen 450 nm und 500 nm (blau) ein bis zu 4-fach höheres Transmissionsvermögen als Bereiche des roten Spektrums (700 nm) (Abb. 3). Dieses Ergebnis eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, bei LEDs, die mit Fluoreszenzfarbstoffen arbeiten, Lichtentstehung und Konvertierung örtlich zu trennen und somit eine Quelle der Wärmeentwicklung vom Halbleitermaterial zu entkoppeln.

Für die revisionierbare Variante mit transluzenten textilummantelten Silikonschläuchen (Light-Tube-Variante) wurde ein Konzept für eine schnurähnliche LED-Komponente entwickelt, die mit textilen Eigenschaften in Abmessungen, Verformbarkeit und der Gewährleistung textiler Verarbeitungsprozesse ausgestattet ist. Hierfür wurden erste Untersuchungen für eine Package-Lösung entwickelt, welches mit Niederspannungsbetrieb, flexiblem Frame und entsprechender Kapselung ausgerüstet ist.

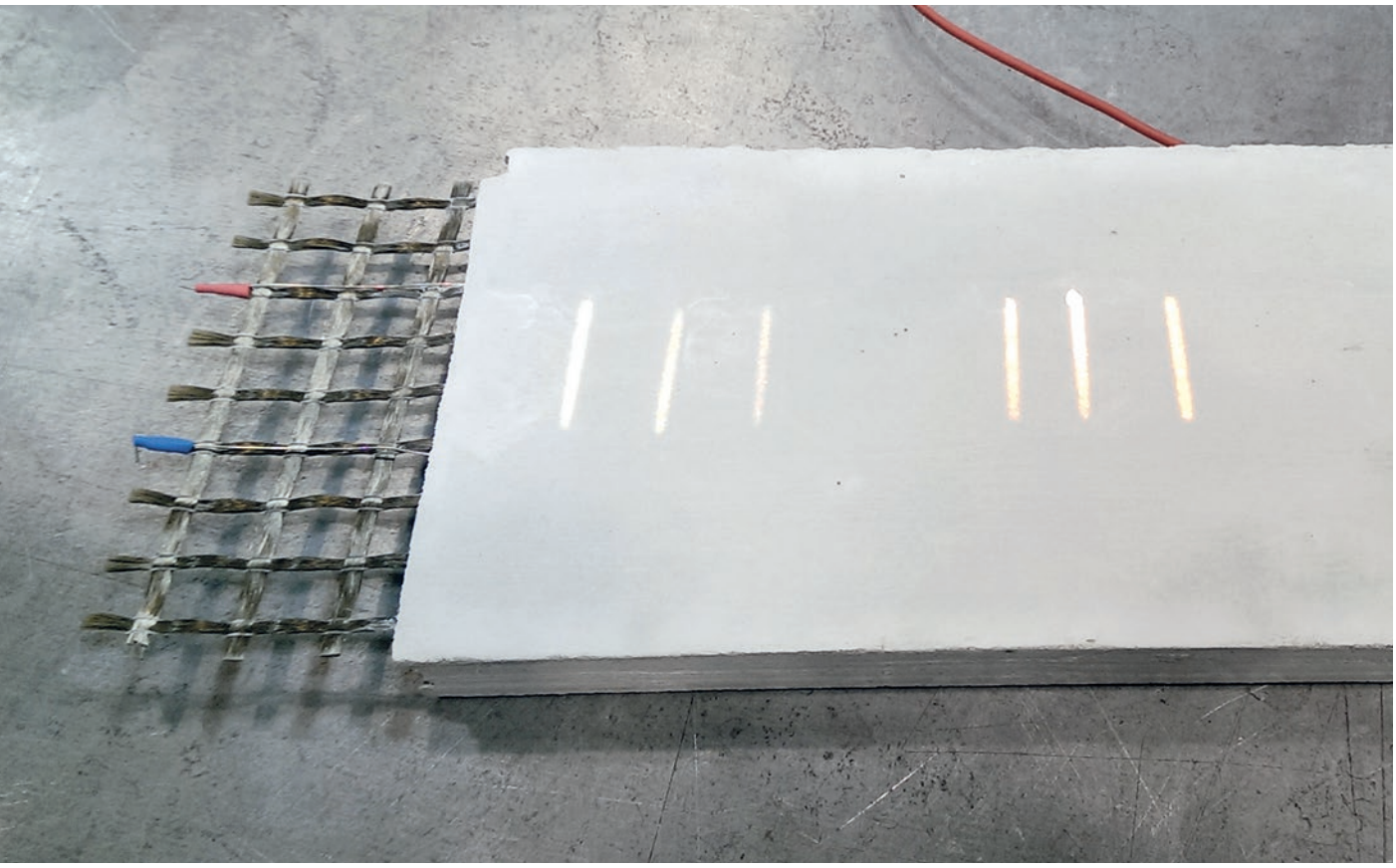


Abb. 2 - Integrierte LED-Strings mit unterschiedlicher Betondeckung

BETONAGE

Der Funktionsnachweis der entwickelten LED-Konzepte wurde mit kleinformatigen Betondemonstratoren erbracht. Die Betonelemente sind mit einer textilen Gitterstruktur aus Carbon bewehrt. Die Carbonbewehrung ermöglicht die Herstellung von dünnen, dauerhaften und hochleistungsfähigen Betonelementen. Vor der Betonage wurden die Bewehrungsstrukturen manuell mit den LED-Komponenten ausgestattet und durch zusätzliche elektrische Leitungen kontaktiert. Die ursprüngliche Idee, die elektrische Leitfähigkeit der Carbonbewehrung zur elektrischen Speisung der LED zu nutzen, wurde im Laufe der Arbeiten verworfen. Sowohl die gezielte Leitungsführung als auch der elektrischer Widerstand und die Kontaktierung auf das Carbon waren unzulänglich. Jedoch ist eine zusätzliche Funktionalisierung der Bewehrung durch textiltechnisch integrierte elektrische Leiter zu untersuchen.

Die mit LED ausgerüstete Bewehrung wurde lagegenau in Holz- oder Kunststoffschalungen fixiert und mit einem fließfähigem Feinkornbeton eingegossen. Das Bindemittel des Feinkornbetons ist ein bis in den Feinststoffbereich granulometrisch abgestimmtes Compound aus Portlandzementklinker und Hüttensand (Hersteller Zementwerk Deuna). Als weiterer Feinstoff wird Kalksteinmehl eingesetzt. Die groben Gesteinskörnungen haben einen Durchmesser bis 2 mm. Durch die granulometrische Optimierung hat der Beton einen geringen Wasseranspruch und damit auch bei geringen Wasser-Zement-Werten ein sehr gutes Fließ- und Entlüftungsverhalten. Der Festbeton hat eine Druckfestigkeit von ca. 110 MPa, verbunden mit hoher Gefügedichtheit und Frostbeständigkeit.

DEMONSTRATOREN

Für einen Einsatz der LED-integrierten Carbonbetonplatten in und an Gebäuden wurden im Rahmen des Projektes beispielhafte Systemaufbauten sowie Designvarianten entworfen. Die verschiedenartigen Varianten wurden als Demonstratoren umgesetzt und verdeutlichen das Gestaltungspotential sowie die Vielfalt einer Kombination von LED und Beton.

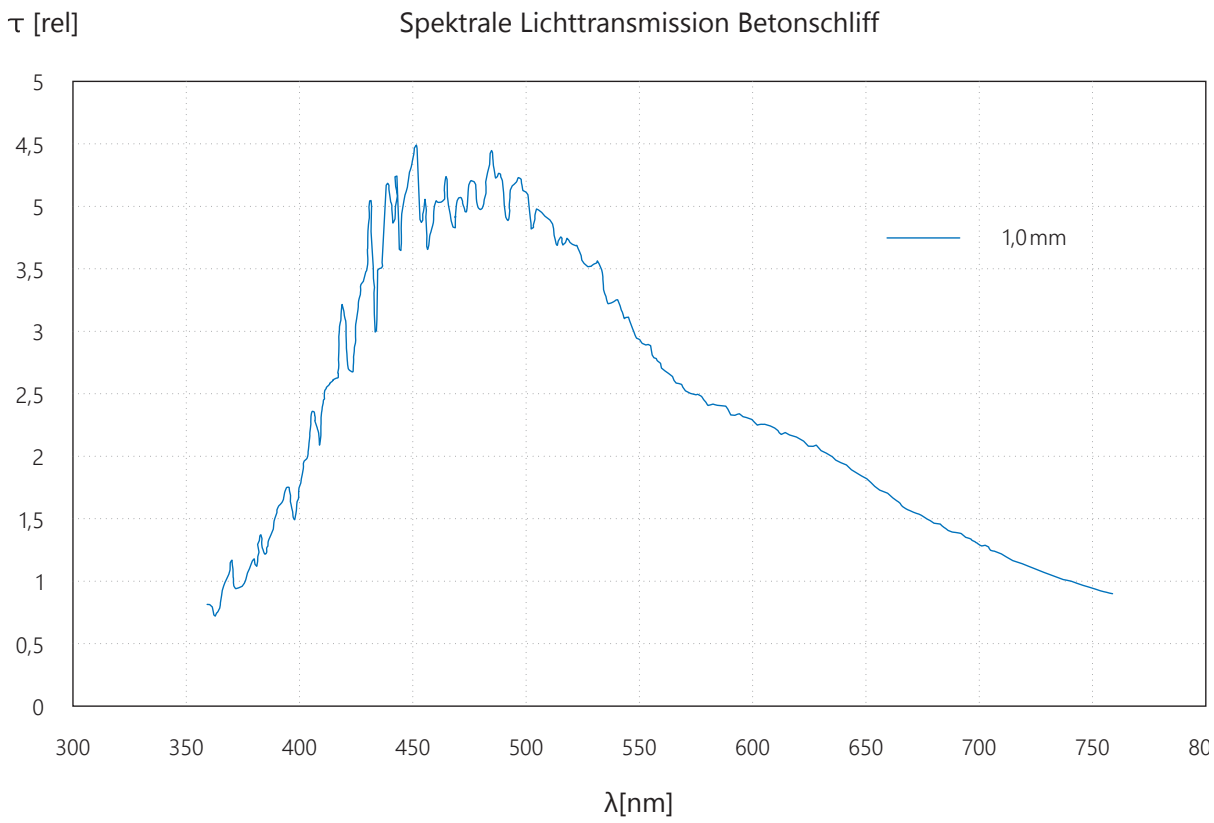


Abb. 3 - Wellenlängenabhängigkeit der Lichttransmission in Beton

BETEILIGTE PARTNER

Prignitz Mikrosystemtechnik GmbH
Signalübertragungs & -aufbereitungselektronik

TU Dresden
Institut für Baustoffe
Betonmatrix & Betonagekonzept

TU Dresden - Institut für Nachrichtentechnik
Faseroptische Sensorik & Funkübertragung

TU Dresden - Institut für Textilmaschinen &
textile Hochleistungswerkstofftechnik
Carbonfaserbasierte Sensorik & textiltechnische Sensorgestaltung

C³SENSE
INTEGRATION VON SENSOREN

Im Teilprojekt C³Sense wurden am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), dem Institut für Nachrichtentechnik (IfN) und dem Institut für Baustoffe (IfB) der TU Dresden in Kooperation mit dem Projektpartner Prignitz Mikrosystemtechnik GmbH (PMST) Sensorlösungen auf Basis resistiver Garnmaterialien sowie auf Faseroptik-Basis konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Diese sind entweder als integraler Bestandteil bei der textiltechnologischen Fertigung der C³-Bewehrung oder als additiv eingebrachtes, resistives In-Situ-Sensorelement ausgelegt, um mechanische Beanspruchungen und daraus resultierende Strukturveränderungen im Inneren von C³-Fassadenelementen erfassen zu können.

AUFBAU DER FASERSENSORIK

Auf Seiten resistiver Fasersensorik werden zwei verschiedene Garnmaterialien herangezogen, die als Sensorelement fungieren: exPAN-basierte Rovings aus Carbonfasern (CF) in den Aufmachungen von 1.000 und 50.000 Filamenten. Beide Garnmaterialien sind aufgrund der intrinsischen Leitfähigkeit der CF-Grundstruktur zwingend elektrisch zu isolieren, wofür zwei Verfahren - Friktionsspinnen und Umflechten - untersucht worden sind. Als dielektrische Isolationsmaterialien werden polyethersulfonbasierte Garnerzeugnisse verwendet: ein Streckband mit 2 x 4,0 ktex für das erste und ein Multifilamentgarn mit 167 dtex für das zweite Verfahren, welche additiv auf das jeweilige CF-Roving aufgebracht wurden. Als durchschlagfestes und sensormaterialschonendes Verfahren wurde das Umflechten identifiziert. Entsprechende Flechtstrukturen konnten dafür erfolgreich hergestellt werden.

Auf Seiten der Faseroptik wurden kurzperiodische Fasergitter (FBG) für Dehnungssensoren und langperiodische Fasergitter (LPG) für faseroptische Temperatur- und Feuchtesensoren hergestellt. Die Herstellung der Fasergitter erfolgte durch UV-Belichtung von mit Germanium dotierten Glasfasern mithilfe eines fokussierten Laserstrahls. Die faseroptischen Dehnungs-, Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren wurden mit unterschiedlichen Packaging-Konzepten verkapselt, im aktiven Gitter-Messbereich mit Glasferrulen (LPG) bzw. 0,8 mm Stahlröhrchen (FBG) gegen Biegespannungseinwirkungen versteift und die im Beton verlaufenden Sensorzuleitungen via PTFE-Röhrchen gegen Schrumpfstauchungen bei der Abbindung des Carbonbetons versehen, um Verluste der optischen Übertragungsleistung zu reduzieren. Zur Steigerung einer kraftschlüssigen Anbindung an die CF-Bewehrungsstruktur wurden die faseroptischen Sensoren beidseitig des Messbereiches zusätzlich mit Epoxidharzkleber verklebt. Für die Realisierung eines neuartigen Feuchtesensors wurden

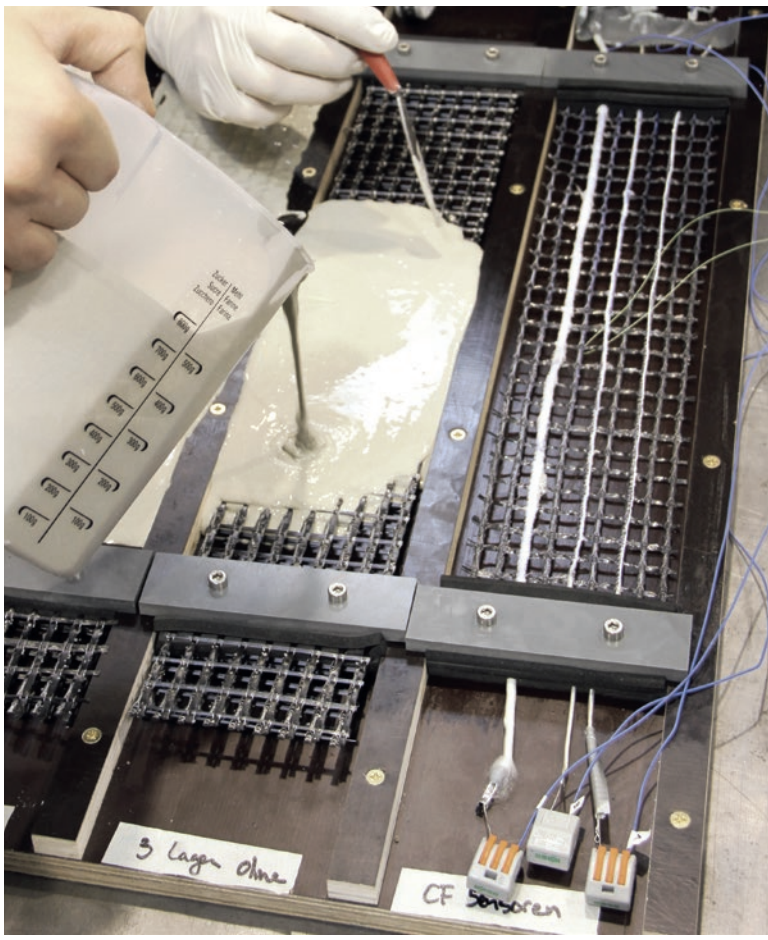


Abb. 1 - Betonage von Mustern mit und ohne CF-Sensoren

bereits in Glasröhrchen eingeklebte langperiodische Fasergitter allseitig mit Hydrogel beschichtet und anschließend mit einer feuchtigkeitspermeablen PES-Mantelstruktur umflochten.

Die resistiven und faseroptischen Sensoren wurden mit der Multiaxialkettenwirktechnik (MALIMO 14024) bei der Fertigung des C^3-Zulassungstextils TUDALIT-BZT1-TUDATEX lokal in Kettrichtung integriert (Abb. 1), wobei sie durch den Wirkfaden entweder auf (resistive 1k-CF-Sensoren bzw. faseroptische Sensoren) oder substituierend anstelle des 50k-Kettfadens (50k-CF-Sensoren) der Grundstruktur gegen den Schussfaden mittels einer gegenlegiger Trikot-Bindung kraftschlüssig fixiert werden.

FUNKTIONSPRÜFUNG

Nach elektrischer Kontaktierung bzw. dem Aufspleißen optischer Verbindungselemente wurden die funktionalisierten Verstärkungshalbzeuge durch das IfB betoniert und nach 6-tägiger Konsolidierung reproduzierbaren zyklischen Belastungsszenarien bei einer Dehnrate von 0,4 mm/min bis 0,375 % Dehnung und abschließender quasistatischer Beanspruchung bis zum Bruch ausgesetzt, wobei die messbaren Sensorsignale analytisch ausgewertet wurden (Abb. 2 & 3).

Als Vorzugsvariante resistiver CF-Sensoren werden Sensoren mit 50 k CF-Roving und geflochtenem PES-Isolationsmantel identifiziert, die den in Kettrichtung verlaufenden Standardkettfaden mit sonst gleicher Konstitution ersetzen. Diese weisen eine Empfindlichkeit k = (0,54 ± 0,02), eine Linearitätsabweichung A_{Lin} = (5,51 ± 1,9) % sowie eine mittlere Hysterese A_{Hys} = (2,47 ± 0,2) % über fünf Beanspruchungszyklen auf. Der faseroptische Dehnungssensor mit FBG weist eine hohe Empfindlichkeit von 7,0 nm/% Resonanzverschiebung auf. Die optischen Fasersensoren mit LPG haben eine Temperaturempfindlichkeit von 0,15 nm/K, die da-

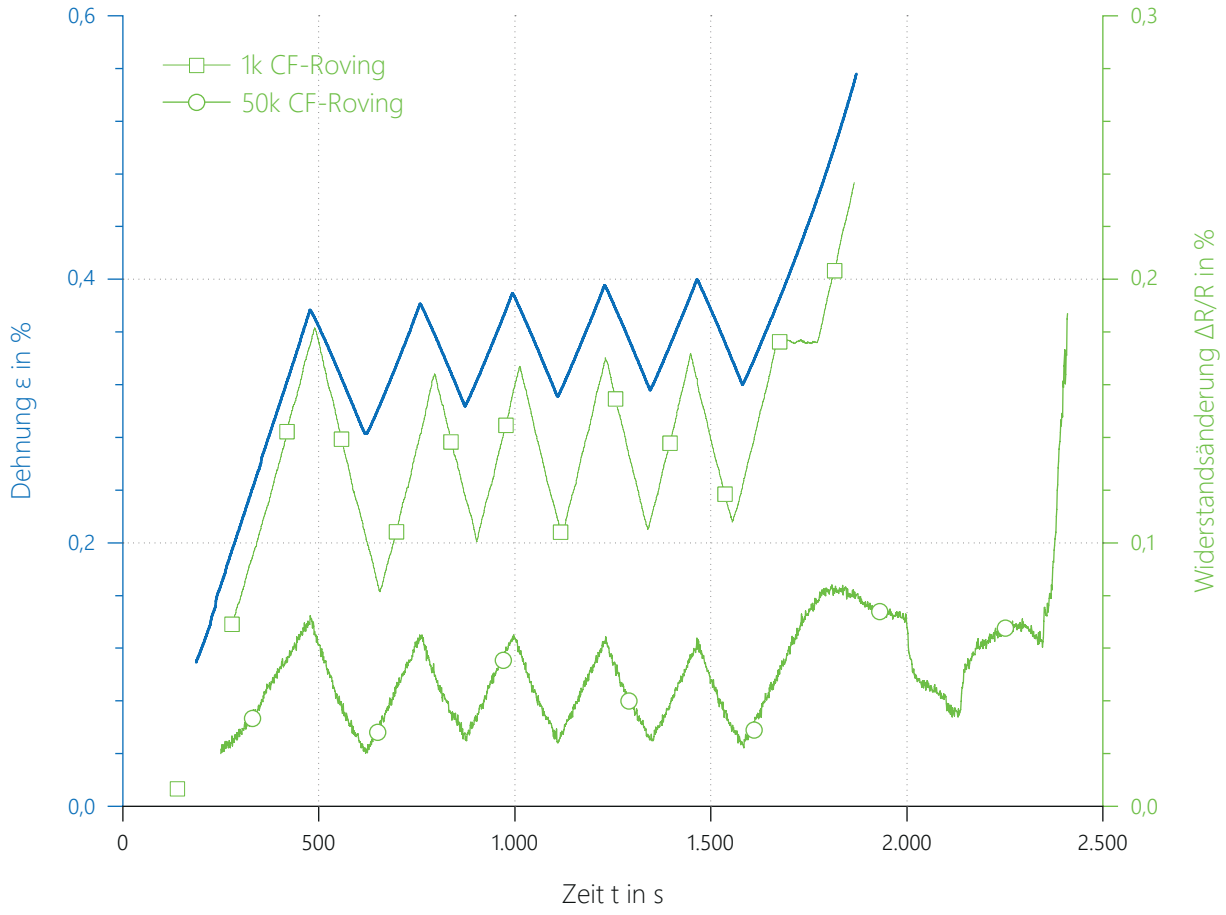


Abb. 2 - Auswertung der CF-Sensoren

mit eine Größenordnung über der Temperaturempfindlichkeit konventioneller FBG-basierter Sensoren liegt. Der faseroptische Feuchtesensor konnte bei konstanter Temperatur von 23 °C eine relative Luftfeuchte > 90 % rH detektieren. Damit war es möglich, den Trocknungsprozess des Betons mit einem integrierten faseroptischen Sensor zu verfolgen.

Weiterhin wurde die Funktionalität einer funkgestützten Radio-Over-Fiber (RoF)-Auswertung im Labormaßstab für die FBG- und LPG-Sensoren untersucht. Dazu wurden die verwendeten Funkfrequenzen und -pegel mit dem Partner PMST abgestimmt sowie verschiedene omni-direktionale abstrahlende Patch-Antennenmuster für eine Funkfrequenz um 2.4 GHz fotolithografisch als Kupferstruktur hergestellt und charakterisiert. Ausgehend von dem zuvor entwickelten Schaltungskonzept und dem optimierten Antennendesign wurden ein Schaltplan und ein Platinenlayout für die RoF-Elektronik entwickelt. Zudem wurde ein 8-Kanal-Messboard mit integriertem Datenspeicher und autonomer Energieversorgung für die resistive Sensorik entwickelt und umgesetzt, das neben der 2-kanaligen Temperaturerfassung mit konventionellen Temperatursensoren PT100/PT1000 zur kontinuierlichen Erfassung und Datenspeicherung der resistiven In-Situ-Sensoren genutzt werden kann.

DEMONSTRATOR

Aufbauend auf den entwickelten Sensor-Vorzugslösungen ist ein geeigneter C³-Funktionsdemonstrator konzipiert und umgesetzt worden. Der als Biegebalkenstruktur ausgelegte Demonstrator enthält in die textile CF-Bewehrungsstruktur implementierte faseroptische und resistive Sensoren. Im Bereich der Auflagersockel wurden für die Aufnahme der Mess- und Auswerteelektronik und als Auflager fungierende Aluminiumgehäuse eingelassen, die nach der Betonage verdeckt nur noch für Wartungsarbeiten über die Stirnflächen zugänglich sind.

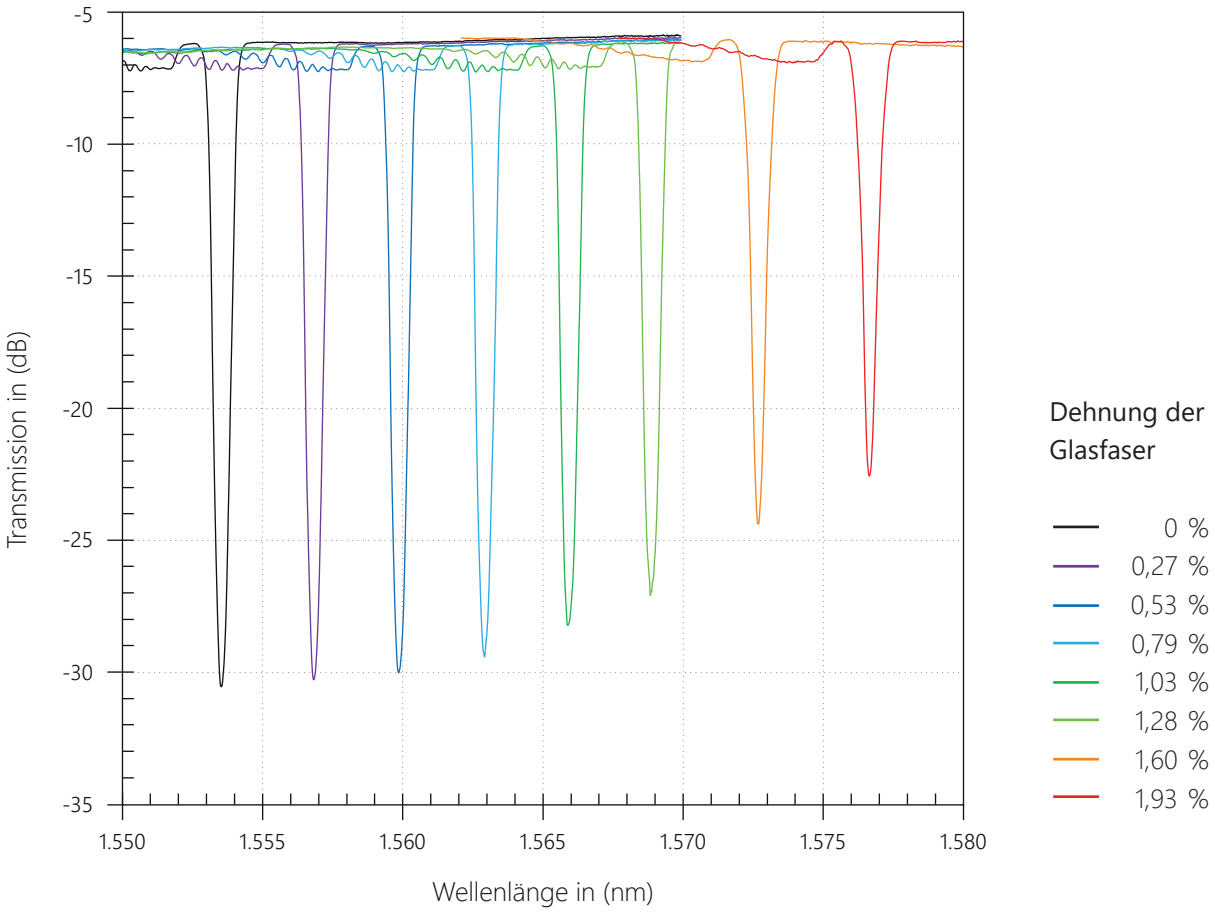
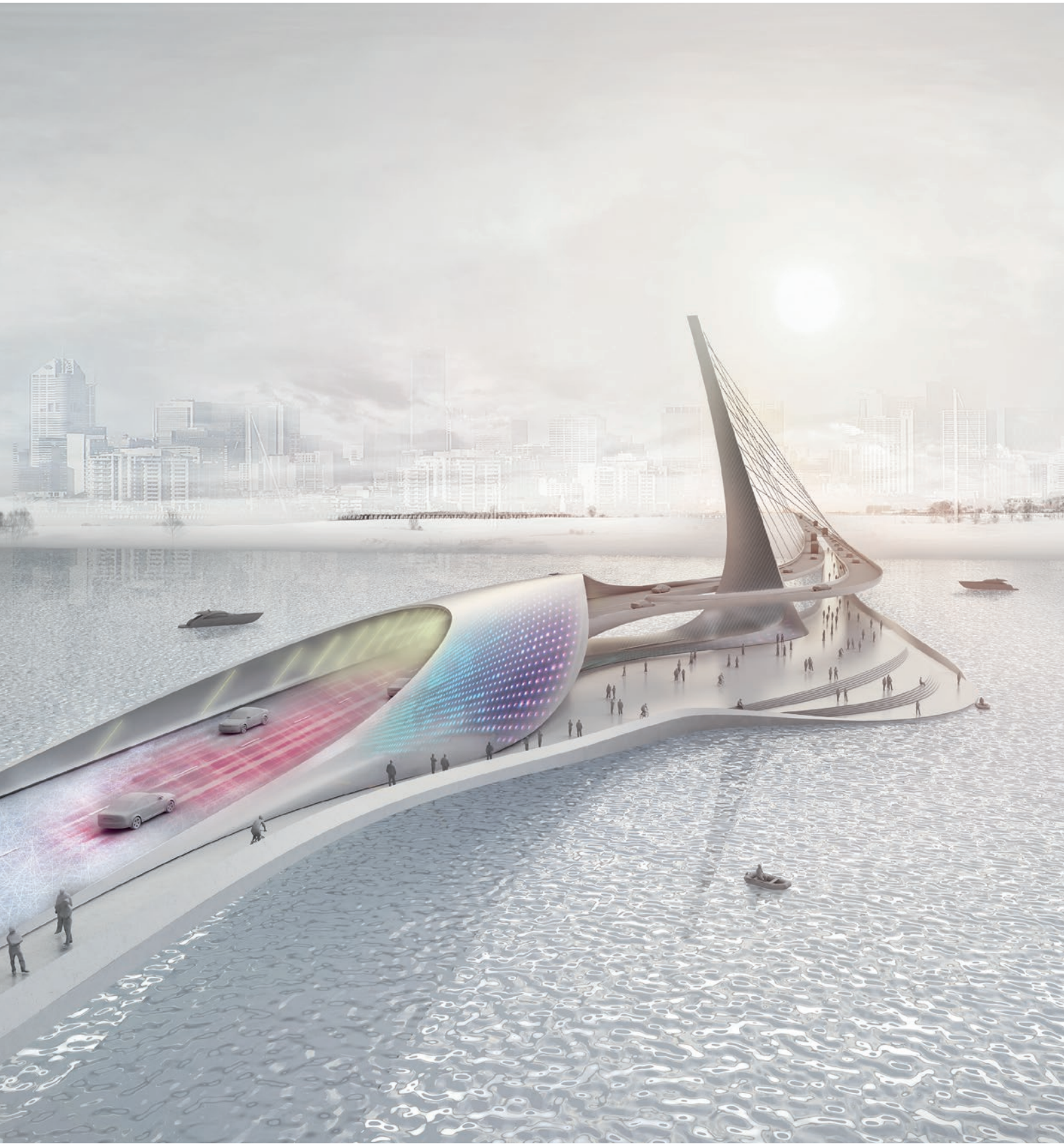


Abb. 3 - Auswertung der faseroptischen Sensoren



BETEILIGTE PARTNER

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissenökonomie
Ökonomische Strategien & Wertschöpfungskette

HTWK Leipzig - Architektur-Institut Leipzig
Verbundkoordination, -vernetzung & ökologische Bewertung

SGB Steuerungstechnik GmbH
Steuerungs-, Verschaltungs- & Energiekonzepte

C³LINK
SYNERGETISCHE VERNETZUNG

Multifunktionalität spielt eine zunehmend größere Rolle in allen Bereichen des Lebens. Auch im Bauwesen werden Bauteile u. a. bedingt durch steigende Effizienzanforderungen zunehmend smarter. Die Materialeigenschaften von Carbonbeton schaffen dafür gute Voraussetzungen, da sie neben einer schlanken, ressourcenschonenden Bauweise die Möglichkeit bieten, die textile Bewehrung für Zusatzfunktionen statisch und elektrisch zu aktivieren. Im Rahmen des C³Basisvorhabens 4 wurden verschiedene Zusatzfunktionen in den Carbonbeton integriert, welche im C³Link auf ihre Kombinationsfähigkeit hin untersucht wurden. Zudem konnte in diesem Teilvorhaben eine übergreifende E-Technik und Ansteuerung für die Bauteile mit elektrischer Zusatzfunktion erarbeitet und die B4-Entwicklungen in die Wertschöpfungskette eingeordnet werden.

DEMONSTRATOR

Eine sinnvolle technologische Kombination von Fassadenfunktionen wurde in einem Demonstrator umgesetzt. Dieser erzeugt Energie auf der Außenseite, speichert diese im Bauteil und speist damit ein Verbrauchssystem auf der raumzugewandten Seite (Abb. 1). Die parametrisch optimierte Außenhaut mit integrierten Photovoltaik-Komponenten ist durch ein Befestigungssystem für vorgehängte hinterlüftete Fassaden mit der dahinterliegenden Konstruktion verbunden. Damit ist die Platte austauschbar, was eine gestalterische Flexibilität an der Außenseite ermöglicht. Zudem können die PV-integrierten Elemente so auch in anderen Fassadensystemen eingesetzt werden. Die Energiespeicherung soll zukünftig ein folienartiger Speicher übernehmen, der schlank und widerstandsfähig in die Dämmebene integriert wird und so das vorhandene Flächenangebot in Fassaden nutzt. Der Speicher ist in der Lage, Energie nach Bedarf aufzunehmen und wieder abzugeben und kann deshalb sowohl einen Teil des Energiebedarfes im Gebäude decken als auch zur Netzstabilisierung herangezogen werden. Damit besitzt er großes Potential für den Einsatz im urbanen Kontext, da Energie direkt dort gespeichert werden kann, wo sie erzeugt und verbraucht wird – in den gebauten Strukturen der Städte. Die Fassadeninnenseite des Demonstrators prägt ein betonintegriertes LED-Pixelfeld, welches zur dynamischen Informationsgebung z. B. in der Gebäudenavigation genutzt werden kann. Die kombinierten Funktionen können im Zusammenspiel miteinander, aber auch separat angesprochen werden.

VERSCHALTUNG & E-TECHNIK

Die elektrotechnische Vernetzung der Arbeitspakete C³PV, C³LED und C³SuperCon ist als Insel- bzw. Offgrid-System realisiert worden und basiert auf der Verschaltung und Steuerung einzelner Gleichspannungsteilnetze. Die optimierte Nutzung des Carbongeleges und mithin die Integration des kompletten Systems in ein Wandmodul ist dabei charakteristisch für das C³Link-Projekt bzw. den Demonstrator. Dabei besteht das System wie erwähnt aus PV-Modul (Energieerzeugung), Energiespeicher, LED-Matrix (Verbraucher) sowie Sensoren (Strom- und Spannungsmessung) mit übergeordneter Steuerungseinheit. Die Steuereinheit ist neben der Überwachung und Steuerung der einzelnen Prozessschritte auch für die Bereitstellung eines Benutzerinterfaces, einschließlich Monitoring der gewonnenen Daten, verantwortlich. Der Nutzer wird damit über das Energiemanagement der C³Link-Fassade informiert und kann manuell auf Zu- und Abschaltungen der einzelnen Module einwirken.

Optimiert wird dieses System durch die Verwendung einer einheitlichen Gleichspannungsebene: Wandlungsverluste und Emissionswerte (Wärme, elektromagnetische Verträglichkeit etc.) können durch das Entfallen von Transformatoren bzw. Spannungswandlern minimiert werden. Mit geringem Aufwand im Personenschutz kann dabei gemäß dem Normenbereich für Kleinspannungen mit bis zu 120 V DC gearbeitet werden. Der C³Link-Demonstrator wurde für eine Spannungsebene von 5 V DC konzipiert. Da es sich hierbei um einen Prototypen handelt, konnte

noch nicht vollständig auf Spannungswandler verzichtet werden. Dies bleibt ebenso Untersuchungsgegenstand wie die Weiterentwicklung des Konzepts von der Insellösung hin zu einem System mit Anschluss ans öffentliche Netz zur Sicherstellung einer stetigen Energieversorgung.

MARKTPOTENTIALE & WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Innovative Technologien können dann erfolgreich sein, wenn Kommerzialisierung und Wertschöpfungsketten früh, bereits während der Forschungsarbeit, berücksichtigt werden. Dazu wurden für das B4 zwei Mechanismen vorgeschlagen und umgesetzt: (1) Durchführung eines Workshops zu Marktpotentialen der Entwicklungen und (2) die Entwicklung sowie Auswertung von Erhebungsblättern. Ziel des Einzelworkshops zu B4-Marktpotentialen war es, die beteiligten Partner bei einer möglichen Etablierung und Kommerzialisierung der Forschungsarbeiten zu unterstützen. Speziell auf die B4-Technologien bezogen würde ein Markteintritt zunächst über eines kleinen Kundenkreis führen, „Innovatoren" oder „Lead User" genannt, die das Produkt trotz eventueller Restfehlerbehaftung zu einem höheren Preis im Vergleich zu Standardprodukten kaufen würden. Damit können spezifische Produkteigenschaften in einer Kundenumfrage ausgewertet und die Zahlungsbereitschaft erschlossen werden. Weiterhin wurden die B4-Partner mithilfe von sogenannten Erhebungsblättern hinsichtlich Stakeholder, Kundensegmente, benötigte Ressourcen und damit verbundenen Investitionen sowie Absätzen befragt, um die Effekte der entwickelten Technologien, z. B. auf die Wertschöpfungskette und die Geschäftsmodelle der B4-Partner, einzuschätzen. Das Konzept der Wertschöpfungskette demonstriert, wie der Wert für den Kunden entlang der Kette unternehmerischer Aktivitäten anwächst. Das Fraunhofer IMW betrachtete die B4-Technologien, indem die beteiligten B4-Partner hinsichtlich ihrer gesamten Prozesse, von Beschaffung über Produktion und Herstellung bis zum Endprodukt befragt wurden und gliederte diese in die abstrakte C^3-Wertschöpfungskette ein. Abb. 2 stellt ein Wertschöpfungskettenszenario unter Berücksichtigung von B4-Technologie dar.

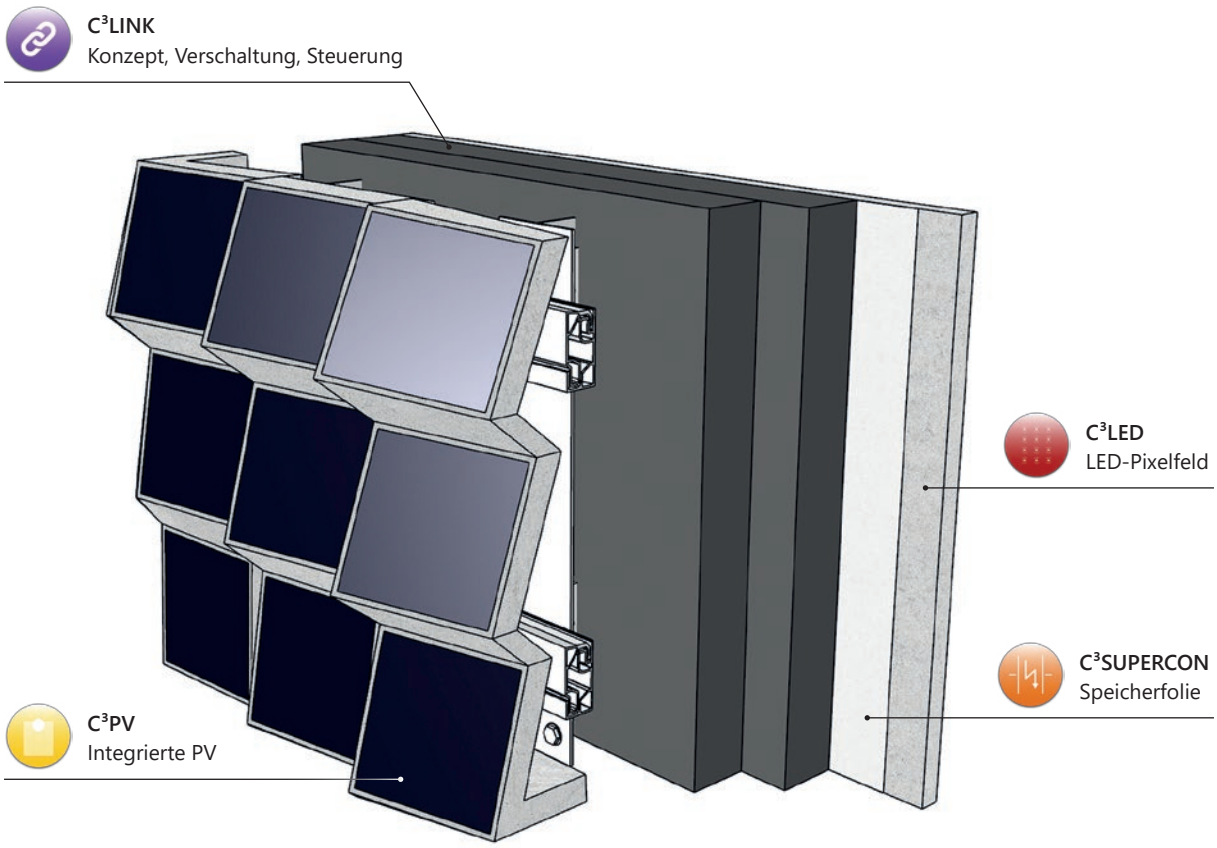


Abb. 1 - Visualisierung des übergeordneten Demonstrators

ZEMENT-HERSTELLUNG	- Gewinnung der Rohstoffe - Verarbeitung der Rohstoffe - Lagerung und Transport	
KIESGRUBE	- Gewinnung Gesteinskörnung - Lagerung und Transport	
BETONWERK	- Lagerung der Betonbestandteile - Verarbeitung der Rohstoffe - Herstellung Frischbeton - Transport Frischbeton und Bauteile	
CARBON-HERSTELLUNG	- Herstellung PAN - Herstellung Precursor - Carbonfaserherstellung	
CARBONHALBZEUG-HERSTELLER	- Beschaffung Carbon - Carbongelegeherstellung - Carbonstabherstellung	
TECHNOLOGIE-HERSTELLUNG	- Bsp. Herstellung LED, Heizmatten...	
SCHALUNGS-HERSTELLUNG	- Ankauf Rohstoffe - Herstellung der Schalung - Verladung der Schalung	
SPEDITION	- Ankauf Rohstoffe - Herstellung der Schalung - Verladung der Schalung	
BETONFERTIGTEIL-WERK (BFTW)	- Abrollen und Zuschneiden - Vorbereitung der Schalung Betonage - Ausschalen und Qualitätsprüfung	ZULIEFERER z.B. Integration LED bei Betonage
STEUERUNGS-TECHNIK	Planung Integration Technologie in Bauteil	
PLANUNGSBÜROS	- Vorgabe Bauinfo - Rechn. Nachweise / Bestimmungen - Statische u. bauliche Vorgaben	ZULIEFERER z.B. PV-Modul zur Anbindung an Fassadenplatte
BAUAUSFÜHRENDE GEWERKE	- Vorbereitung der Bauleistung - Ausführung d. Bauleistung - Bauüberwachung	ZULIEFERER z.B. PV-Modul zur Anbindung an Fassadenplatte
NUTZUNGSPHASE	- Instandhaltung - Inspektion - Umnutzung	WARTUNG TECHNOLOGIE
RÜCKBAU	- Rückbau / Zerstörung - Abtransport Bauschutt - Recycling / Downcycling / Deponierung	STOFFLICHE TRENNUNG z.B.Technik vom Bauteil

Abb. 2 - Wertschöpfungskettenszenario

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Umschlagsgestaltung
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

C³B4, S. 6
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

C³INFRALIGHT, S. 8
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1 - Gleichzeitige Betonage von ILC und Feinbeton, S. 9, Foto: S. Knechtges, ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 2 - Schubgitter aus Carbongelegen, S. 10
Foto: Dr.-Ing. A. Shams, Solidian GmbH

Abb. 3 - Visualisierung der C³Infralight-Demonstratoren, S. 11
Visualisierung: S. Knechtges, ai:L der HTWK Leipzig

C³SANDWICH, S. 12
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1 - Ergebnis einer geometrischen Formstudie, S. 13
Grafik: R. Heiland, ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 2 - Wölbstrukturiertes Cabongelege, S. 14, Foto: M. Mirtsch, Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH

Abb. 3 - Ergebnisse der Belastungsversuche der Verbundgitter mit geradem und wölbstrukturiertem Steg, S. 15, Grafik: A. von der Heid, IMB der RWTH Aachen

---

C³PV, S. 16
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1 - Simulation einer solar optimierten Fassade, S. 17
Grafik: A. Heller, ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 2 - Silikonmatrize & vorgeformtes Bewehrungstextil, S. 18
Foto: A. Heller, ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 3 - Oberflächenbündig integrierte PV-Elemente im Carbonbeton, S. 19
Foto: S. Huth, ai:L der HTWK Leipzig

C³SUPERCON, S. 20
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1 - Linearbeschichtungsanlage, S. 21
Foto: Dr. Hartmut Leipner und T. Mälzer, IZM der MLU Halle

Abb. 2 - Rakelbeschichtung von Kondensatorfolien, S. 22
Foto: Dr. Hartmut Leipner und T. Mälzer, IZM der MLU Halle

Abb. 3 - Querschnittaufnahme einer Kondensatorfolie mit annähernd homogener Verteilung der Keramikpartikel, S. 23, Foto: Dr. Hartmut Leipner und T. Mälzer, IZM der MLU Halle

---

C³DAYLIGHT, S. 24
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1. - Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters, S. 25
Grafik: C. Franz, ITM der TU Dresden

Abb. 2. - Detail einer Doppelgreifer-Webmaschine, S. 26
Foto: Stäubli Bayreuth GmbH

Abb. 3. - Lichttechnische Bewertung eines Probekörpers, S. 27
Foto: M. Polster, Vosla GmbH

C³LED, S. 28
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1. - LED-Pixelfeld mit aufgestickten Leiterbahnen, S. 29, Foto: K. Ullrich, TITV Greiz e. V.

Abb. 2. - Integrierte LED-Strings mit unterschiedlicher Betondeckung, S. 30, Foto: M. Reichardt, IfB der TU Dresden

Abb. 3. - Wellenlängenabhängigkeit der Lichttransmission in Beton, S. 31,
Grafik: M. Polster, Vosla GmbH

C³SENSE, S. 32
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1. - Betonage von Mustern mit und ohne CF-Sensoren, S. 33
Foto: IfB der TU Dresden

Abb. 2. - Auswertung der CF-Sensoren, S. 34
Grafik: E. Häntzsche, IfN der TU Dresden

Abb. 3. - Auswertung der faseroptischen Sensoren, S. 35
Grafik: Dr.-Ing. T. Schuster, IfN der TU Dresden

C³LINK, S. 36
Visualisierung: ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 1. - Visualisierung des übergeordneten Demonstrators, S. 38
Grafik: S. Huth, ai:L der HTWK Leipzig

Abb. 2. - Wertschöpfungskettenszenario, S. 39, Grafik: Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissenökonomie

---

ANSPRECHPARTNER

Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH
Herr Michael Mirtsch
Mühlenstr. 62, 13187 Berlin
Tel.: +49 30 91745248
m.mirtsch@drmirtschgmbh.de

Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik
Herr Dr. Jens Schneider
Otto-Eißfeldt-Str. 12, 06120 Halle/S.
Tel.: +49 345 5589-5500
jens.schneider@csp.fraunhofer.de

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissenökonomie
Herr Dr. Nizar Abdelkafi
Neumarkt 9, 04109 Leipzig
Tel.: +49 341 231039-143
nizar.abdelkafi@imw.fraunhofer.de

HFB Engineering GmbH
Herr Uwe Gies
Zschortauer Str. 42, 04129 Leipzig
Tel.: +49 341 5636-309
u.gies@hfb-online.de

HTWK Leipzig
ai:L - Architektur-Institut Leipzig
Herr Stefan Huth
Karl-Liebknecht-Str. 132, 04277 Leipzig
Tel.: +49 341 3076-6540
stefan.huth@htwk-leipzig.de

MLU Halle-Wittenberg
Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften
Herr Dr. Hartmut Leipner
Nanotechnikum Weinberg
Heinrich-Damerow-Str. 4, 06120 Halle/S.
Tel.: +49 345 5528473
hartmut.leipner@cmat.uni-halle.de

Prignitz Mikrosystemtechnik GmbH
Herr Dr. Gert Schönfelder
Margarethenstr. 61, 19322 Wittenberge
Tel.: +49 3877 56746-11
schoenfelder@prignitz-mst.de

RWTH Aachen
Institut für Massivbau
Herr Dr.-Ing. Norbert Will
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen
Tel.: +49 241 80-25171
nwill@imb.rwth-aachen.de

SGB Steuerungstechnik GmbH
Herr Jens Krüger
Marschnerstr. 13, 04109 Leipzig
Tel.: +49 341 9823720
mail@sgb-leipzig.de

Solidian GmbH
Herr Dr.-Ing. Ali Shams
Sigmaringstr. 150, 72458 Albstadt
Tel.: +49 7431 10-3148
ali.shams@solidian.com

Solar Valley GmbH
Herr Dr. Hans-J. Krokoszinski
Juri-Gagarin-Ring 152, 99084 Erfurt
Tel.: +49 361 644188-0
info@solarvalley.org

Stäubli Bayreuth GmbH
Herr Dr.-Ing Andreas Schnabel
Theodor-Schmidt-Str. 19, 95411 Bayreuth
Tel.: +49 921 883-1474
a.schnabel@staubli.com

Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.
Herr Kay Ullrich
Zeulenrodaer Str. 42-44, 07973 Greiz
Tel.: +49 3661 611-314
k.ullrich@titv-greiz.de

TU Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Herr Dr.-Ing. Arndt Goldack
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin
Tel.: +49 30 314-72136
arndt.goldack@tu-berlin

TU Dresden
Institut für Baustoffe
Herr Dr.-Ing. Marko Butler
Georg-Schumann-Str. 7, 01187 Dresden
Tel.: +49 351 463-35925
marko.butler@tu-dresden.de

TU Dresden
Institut für Nachrichtentechnik
Herr Dr.-Ing. Niels Neumann
Georg-Schumann-Str. 9, 01187 Dresden
Tel.: +49 351 463-32146
niels.neumann@tu-dresden.de

TU Dresden
Institut für Textilmaschinen
C³DAYLIGHT - Herr Christian Franz
Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Tel.: +49 351 463-34693
christian.franz@tu-dresden.de

C³SENSE - Herr Dr.-Ing. Andreas Nocke
George-Bähr-Str. 3c, 01069 Dresden
Tel.: +49 351 463-35244
andreas.nocke@tu-dresden.de

Universität Stuttgart
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Herr Dr.-Ing. Walter Haase
Pfaffenwaldring 14, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 711 685-68310
walter.haase@ilek.uni-stuttgart.de

Vosla GmbH
Herr Martin Polster
L.-F.-Schönherr-Str. 15, 08523 Plauen
Tel.: +49 3741 396-434
info@vosla.com

ASSOZIIERTE PARTNER

Deutsche Basalt Faser GmbH
Herr Georgi Gogoladze
Carl-Rabe-Str. 11, 06526 Sangerhausen
Tel.: +49 3464 276769-0
info@deutsche-basalt-faser.de

Evonik Resource Efficiency GmbH
Frau Dr.-Ing. Gabriele Gärtner
Rodenbacher Chaussee 4,
63457 Hanau-Wolfgang
Tel.: +49 6181 59-4760
gabriele.gaertner@evonik.com

Fachvereinigung Deutscher Betonfertigbauteile e. V.
Frau Elisabeth Hierlein
Schloßallee 10, 53179 Bonn
Tel.: +49 228 9545-655
hierlein@fdb-fertigteilbau.de

Halfen GmbH
Herr Dr.-Ing. Matthias Roik
Liebigstr. 14, 40764 Langenfeld
Tel.: +49 2173 - 970 485
matthias.roik@halfen.de

IMPRESSUM

Herausgegeben vom
Architektur-Institut Leipzig
Prof. Frank Hülsmeier | Architekt
Karl-Liebknecht-Str. 132, 04277 Leipzig

Ansprechpartner:
Stefan Huth | Architekt
Tel.: +49 341 3076-6540
E-Mail: stefan.huth@htwk-leipzig.de

Layout & Satz:
Romy Heiland | Architektin

Druck:
Hausdruckerei der HTWK Leipzig

© Texte und Bilder bei den Autoren
soweit nicht anders angegeben.

Erste Auflage 2016
© 2016 Architektur-Institut Leipzig
Alle Rechte vorbehalten
ISBN 978-3-9818459-0-7

SPONSORING

Architektur.visuell
Karl-Liebknecht-Str. 88, 04275 Leipzig

Deuna Zement GmbH
Werkstr. 1 3, 37355 Deuna

Dow Deutschland Anlagengesellschaft mbH
Am Kronberger Hang 4, 65824 Schwalbach

Heliatek GmbH
Treidlerstr. 3, 01139 Dresden

MAAS Profile GmbH
Friedrich-List-Str. 25, 74532 Ilshofen

MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG
Am Kruppwald 1-8, 46238 Bottrop

Pfleiderer Holzwerkstoffe GmbH
Ingolstädter Str. 51, 92318 Neumarkt

RECKLI GmbH
Gewerkenstr. 9a, 44628 Herne

Sto SE & Co. KGaA
Ehrenbachstr. 1, 79780 Stühlingen

Strobel Quarzsand GmbH
Freihungsand 3, 92271 Freihung

GEFÖRDERT VOM:

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

PROJEKTTRÄGER:

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

IN ZUSAMMENARBEIT MIT:

C3 carbon concrete composite

ISBN 978-3-9818459-0-7

9 783981 845907