

# HighTechMatBau Kick-Off-Tagung

*am 28. September 2015 in Düsseldorf*

*Tagungsband mit Beiträgen  
zu den Projekten aus  
NanoTecture und HighTechMatBau*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Beiträge der

**HighTechMatBau  
Kick-Off-Tagung**

am 28. September 2015  
in Düsseldorf



Redaktion: Im Rahmen des Transferprojekts WiTraBau  
Dr.-Ing. Kenji Reichling  
Dr.-Ing. Udo Wiens  
Mirsada Omercic

Auflage: 200 Stück

Druck: Albersdruck GmbH & Co. KG  
Leichlinger Straße 11  
40591 Düsseldorf

## Vorwort

Mit rund 2 Mio. Beschäftigten und einem realen Bauvolumen im dreistelligen Milliardenbereich ist das Baugewerbe einer der wichtigsten Wirtschaftszweige Deutschlands. Aufgrund der steigenden Baunachfrage kommt der Erforschung von neuen und verbesserten Baustoffen und Materialien eine besondere Bedeutung zu.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert mit der Bekanntmachung HighTechMatBau Forschungsprojekte zum Thema „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen“. Der Förderschwerpunkt des Programms „Vom Material zur Innovation“ ist Bestandteil der Hightech-Strategie der Bundesregierung, welche das Ziel verfolgt, mit Hilfe der Schlüsseltechnologien Lösungsbeiträge zu den globalen Herausforderungen zu leisten. Er schließt damit an den Erfolg der vorangegangenen BMBF-Initiative „Nanotechnologie im Bauwesen - NanoTecture“ an.

Um den Projektpartnern eine gemeinsame Plattform zu ermöglichen, wird eine „Kick-Off-Tagung“ für die Beteiligten aus NanoTecture und HighTechMatBau am 28. September 2015 in Düsseldorf veranstaltet. Alle Teilnehmer haben damit die Gelegenheit, einen Überblick über die geförderten Forschungsvorhaben zu bekommen, sich in den Pausen persönlich auszutauschen und zu vernetzen.

Die Veranstaltung wird im Rahmen des wissenschaftlichen Begleitprojektes „WiTraBau — Wissenstransfer im Bauwesen“ (HighTechMatBau) im Auftrag des BMBF ausgerichtet. Das Ziel des Begleitprojektes besteht in der Unterstützung beim Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Auf [www.hightechmatbau.de](http://www.hightechmatbau.de) können sich zukünftig alle Interessierten über die Projekte und weitere Aktivitäten informieren.

Liane Horst  
Leiterin des Referats 511  
Neue Materialien und Werkstoffe; KIT; HZG  
Bundesministerium für Bildung und Forschung





## Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>"HighTechMatBau - Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen" .....</b> | <b>1</b>   |
| WITRABAU .....   | 1          |
| <b>R-BETON</b> .....   | <b>8</b>   |
| DYFRACEM .....   | 14         |
| SULFOAM .....  | 18         |
| PUREBAU .....  | 24         |
| SMART-DECK .....   | 29         |
| NAHITAS .....  | 34         |
| SEDA .....   | 35         |
| NAPOS .....  | 41         |
| ECOSPHERE .....  | 48         |
| THELMA .....   | 51         |
| <b>"NanoTecture - Nanotechnologie im Bauwesen" .....</b>                   | <b>53</b>  |
| BOHRSPITZEN AUS UHPC .....   | 55         |
| OLAF .....   | 60         |
| UHPCROAD .....   | 70         |
| KALT HÄRTENDE KERAMIK .....  | 73         |
| NANOCARBO .....  | 74         |
| FUTURZEMENT .....  | 78         |
| HELIOCLEAN .....   | 81         |
| TIO2TRC .....  | 85         |
| SILAMARK .....   | 93         |
| NANO-LAMBDA .....  | 101        |
| NANOUV .....   | 105        |
| <b>"KMU-innovativ" .....</b>   | <b>107</b> |
| FUNKTIONALFASER .....  | 109        |



Projektbeiträge aus der Förderinitiative

**"HighTechMatBau -  
Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen"**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Wissenstransfer im Bauwesen

WITRABAU

Kenji Reichling, Mirsada Omercic, Udo Wiens

*Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.*

## 1 Kurzfassung

Sieben Verbundpartner aus den Bereichen Forschung, Industrie und Regelwerksetzung haben sich zusammengeschlossen, um den Transfer neuer innovativer Werkstoffe vom Labor in die Praxis zu beschleunigen. Im Fokus stehen die Projekte aus den Förderprogrammen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „NanoTecture“ (abgeschlossen, Kurzbeschreibungen der Vorhaben s. S. 55 bis 106) und „HighTechMatBau“ (laufend, Kurzbeschreibungen der Vorhaben s. S. 8 bis 52). Bisher wurde u. a. eine Systematik entwickelt, mit der die Ergebnisse so aufbereitet werden, dass alle Verwertungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden können. Die aktuell laufenden Forschungsvorhaben aus „HighTechMatBau“ werden während der Projektlaufzeit mit dem Ziel beraten, am Ende eine möglichst breite Verwertung zu erreichen. Für die Aufbereitung der Forschungsergebnisse hat sich das WiTraBau-Konsortium für die Delphi-Methode entschieden, bei der die Ergebnisse durch Expertenbefragungen in eine verwertbare Form gebracht und geeigneten Verwertungsoptionen zugeordnet werden. Die so erarbeiteten Verwertungsvorschläge werden mit den forschenden Stellen (Zuwendungsempfängern) besprochen und die jeweilige weitere Vorgehensweise individuell abgestimmt.

## 2 Ziel

Das vom BMBF geförderte Projekt „WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen“ ist Bestandteil des Materialforschungsprogramms HighTechMatBau und damit der neuen HighTech-Strategie der Bundesregierung. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Innovationskraft zukunftsfähiger Märkte in Deutschland aktiv zu fördern. Durch die Marktzugänglichkeit neuer, innovativer Werkstoffe soll nicht zuletzt die Bauwirtschaft auch im internationalen Vergleich gestärkt werden.

Damit dieses Ziel erreicht werden kann, haben sich die Verbundpartner (siehe Bild 1) aus den Bereichen Forschung, Industrie und Regelwerksetzung in einem Projektkonsortium zusammengeschlossen und unterstützen die schnellere baupraktische Anwendung neuer innovativer Werkstoffe.



Bild 1: Zusammensetzung des Projektkonsortiums

Fig. 1: Composition of the project consortium

### 3 Vorgehensweise

#### 3.1 Allgemeines

Die WiTraBau-Verbundpartner unterstützen im Rahmen des Transferprojekts die forschenden Stellen bei der Entwicklung von Verwertungsstrategien sowie bei deren Umsetzung. Da die Ergebnisse aus dem abgeschlossenen Förderprogramm NanoTecture bereits vorliegen, fanden und finden dort erste Verwertungsschritte statt. Die Forschungsprojekte aus HighTechMatBau laufen zeitlich parallel zum vorliegenden Transferprojekt, so dass in dieser Hinsicht eine unterstützende Rolle des Konsortiums während den Projektlaufzeiten angestrebt wird. Die Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen können so bereits zu Beginn ihrer Arbeiten unterstützt werden, indem gemeinsam eine geeignete Verbreitung vorbereitet und die bestmögliche Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis geplant wird.

Damit neue Werkstoffe die Hürde des Marktzugangs meistern, muss eine gewisse Marktreife erreicht werden. In Bild 2 sind die Stationen und Eckpfeiler zum Erreichen des Ziels dargestellt, die bei der Verwertungsstrategie des Konsortiums berücksichtigt werden.

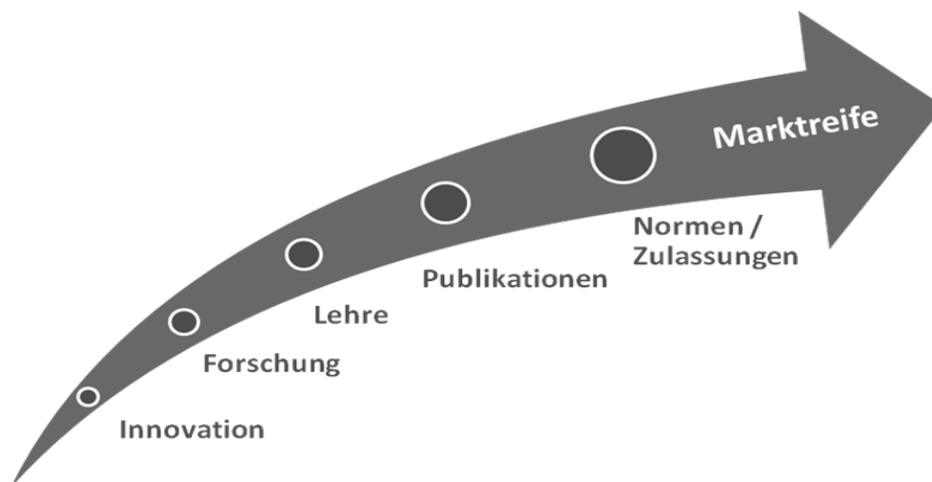


Bild 2: Verwertungsschritte von der Innovation bis zur Marktreife

Fig. 2: Exploitation stages from the innovation towards marketability

Eine wesentliche Aufgabe besteht in der adressatengerechten Aufbereitung und Verbreitung der Forschungsergebnisse für die unterschiedlichen Zielgruppen der Wertschöpfungskette des Bauwesens, wie z. B. Baustoffhersteller, Bauunternehmen, Ingenieurbüros und Architekten. Es werden dabei die weitreichenden Netzwerke der Verbundpartner genutzt. Im Einzelnen sind u. a. folgende Wege des Technologietransfers geplant:

- Begleitung im Verwertungsprozess,
- Beratung projektbezogener Verwertungsmöglichkeiten in Fachgremien,
- Einbringen geeigneter Ergebnisse in Regelwerke,
- Adressatengerechte Veröffentlichung der Ergebnisse,
- Ausrichten von Informationsveranstaltungen.

Die Beratungen erfolgen in den Fachgremien der WiTraBau-Verbundpartner oder in Gremien Dritter, hierzu zählen ebenfalls Normungsgremien. Es wird angestrebt, dass die forschenden Stellen ihre Ergebnisse vorstellen und im Gremium gemeinsam über die weitere Vorgehensweise beraten wird.

Die Zuwendungsempfänger sollen hinsichtlich einer möglichst breiten Verwertung beraten werden. Im Rahmen der HighTechMatBau-Projekte wird beispielsweise einer der Verbundpartner aus WiTraBau gemeinsam mit den Zuwendungsempfängern eine Verwertungsstrategie erarbeiten und unter Einbindung des Netzwerks aller WiTraBau-Verbundpartner die Verwertungswege ebnen. Die Verbundpartner werden den Forschungsprojekten entsprechend ihrer fachlichen Kompetenzen zugeordnet. Ferner besteht die Möglichkeit, die Forschungsergebnisse über die Publikationswege der Verbundpartner zu veröffentlichen. Beispielhaft sei das Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB) als die zentrale Einrichtung für den nationalen und internationalen Transfer von Baufachwissen genannt. Es ist ebenfalls geplant, Ergebnisse, die für die Aus- und Weiterbildung sowie die Hochschullehre geeignet sind, entsprechend aufzubereiten und zu kommunizieren.

Für 2018 ist eine Fachtagung geplant, bei der alle Forschungsergebnisse und Demonstratoren aus HighTechMatBau vorgestellt werden. Nähere Informationen werden zuvor u. a. über die Internetseite [www.hightechmatbau.de](http://www.hightechmatbau.de) veröffentlicht.

### 3.2 Projektergebnisse aus NanoTecture

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat als Beitrag zur Hightech-Strategie der Bundesregierung zwischen 2009 und 2012 FuE-Projekte zum Thema „Nanotechnologie im Bauwesen - NanoTecture“ gefördert. Im Zentrum der Fördermaßnahme standen nanotechnologische Verfahren und Nanomaterialien, die zu einer deutlichen Einsparung von Energie im Bauwesen beitragen konnten und ein hohes wirtschaftliches Potential besaßen. Das Ziel bestand darin, neue oder deutlich verbesserte Baustoffe, Materialien und Produkte sowie Verfahren durch die Anwendung von Nanotechnologien zu entwickeln. Hierdurch sollte die Innovationskraft des deutschen Bauwesens gestärkt werden. Im Vordergrund standen dabei die Themen:

- Energieeffizienz,
- Dauerhaftigkeit und
- Festigkeit von Werkstoffen und Bauteilen.

Um deren Marktzugang zu beschleunigen, soll gemeinsam mit den ehemaligen Zuwendungsempfängern ein geeignetes Verwertungskonzept erarbeitet werden. Um geeignete Verwertungswege zuzuordnen und keine Verwertungschance unberücksichtigt zu lassen, wurde ein Evaluierungskonzept erarbeitet, das im Folgenden kurz erläutert wird.

Das Konzept sieht vor, dass die erzielten Projektergebnisse auf Basis der öffentlich zugänglichen Abschlussberichte detailliert erfasst und mit einer Kurzbeschreibung dokumentiert werden. Danach wird für jedes Ergebnis eine der folgenden Erkenntnisstufen ausgewählt:

- Grundlagenuntersuchung als Basis für weitere anwendungsbezogene Forschung,
- Anwendungsbezogene Forschung als Basis für die weitere Produktentwicklung,
- Beispielhafte anwendungsbezogene Forschung, die die Grundlage für eine bauordnungsrechtliche Umsetzung bildet,
- Breit angelegte anwendungsbezogene Forschung, die Eingang in Merkblätter, Richtlinien oder Normen finden kann.

Ein zentraler Punkt besteht in der anschließenden Zuordnung von geeigneten Verwertungsoptionen (siehe Tabelle 1). Diese ergeben sich üblicherweise in Abhängigkeit der Erkenntnisstufe.

Tabelle 1: Potentielle Optionen zur Verwertung der Forschungsergebnisse

Table 1: Feasible options for the exploitation of the research results

| Verwertungsoptionen  |
|--|
| Eingang in nachfolgende Forschungsprojekte   |
| Fachspezifische Veröffentlichungen, Vorträge und Fachzeitschriften, etc.,<br>Aufnahme in Forschungsdatenbanken       |
| Vorlesungen an Hochschulen, Fachhochschulen, u. ä.   |
| Leitfäden und Lehrmaterialien für Industrie und Gewerbe<br>(z. B. für die Aus- und Weiterbildung des Werkspersonals) |
| Sachstandberichte und Wissensdokumente als Vorstufe zur Regelwerksetzung   |
| Merkblätter mit Branchenbezug<br>z.B. Zementindustrie, Bauwirtschaft, Transportbetonindustrie)                       |
| Regelwerke mit „Normencharakter“   |
| Regelwerke der Verbundpartner (Richtlinien, TL, TP, M, ZTV);<br>Aufnahme in bestehende oder neue Regelwerke          |
| Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ)  |
| Einbringen in Normenausschüsse des DIN (NABau)   |
| Anwendungsbezogene Entwicklung   |
| Verwertungsvorschläge der Zuwendungsempfänger  |

Um eine möglichst objektive und allumfassende Verwertung zu ermöglichen, hat sich das WiTraBau-Projektconsortium für eine Evaluierung in Anlehnung an die Delphi-Methodik entschieden. Bei einer Delphi-Befragung wird z. B. mehreren Experten ein Fragen- oder Thesenkatalog für eine bestimmte technische Aufgabenstellung vorgelegt. Die Befragten haben in zwei oder mehr Runden die Möglichkeit, ihre Erfahrungswerte und Meinungen zu dieser Aufgabenstellung aufzuschreiben. Ab der zweiten Runde wird Feedback gegeben, wie andere Experten geantwortet haben. Als Ergebnis soll sich ein abgestimmter Konsens der Befragten herausbilden. Im Rahmen von WiTraBau wurden in Anwendung dieser Methodik die Abschlussberichte von jedem Projekt durch zwei WiTraBau-Verbundpartner gesichtet, in Einzelergebnisse aufgegliedert, Kurzfassungen erstellt sowie Erkenntnisstufe und Verwertungsoptionen zugeordnet. Auf Basis dieser beiden Vorschläge wurde von beiden Verbundpartnern gemeinsam ein abschließender Vorschlag erarbeitet. Die generelle Vorgehensweise ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Zur Erleichterung bei der Durchführung der Evaluierung hat der VDZ eine online-Plattform eingerichtet, die es den Verbundpartnern ermöglicht, über Eingabemasken die Evaluierungsstruktur aufrechtzuerhalten.

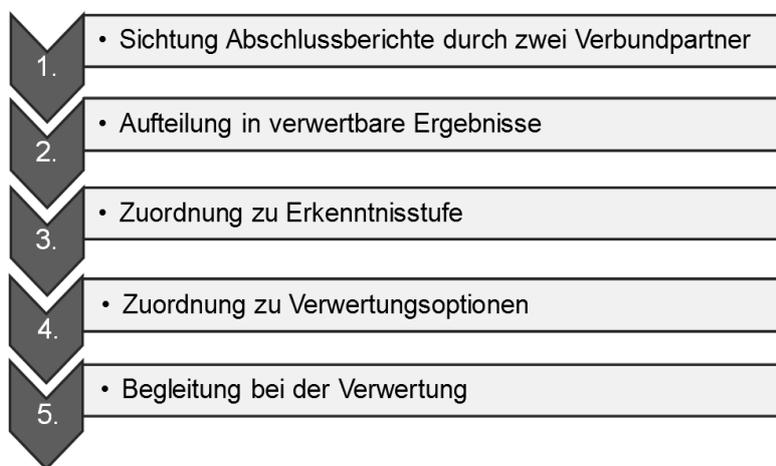


Bild 3: Vorgehensweise bei der Evaluierung der Verwertungsoptionen

Fig. 3: Procedure to evaluate the exploitation options

Es hat sich gezeigt, dass die Aufteilung in Einzelergebnisse größtenteils übereinstimmte, bei der Wahl der Verwertungsoptionen jedoch unterschiedliche Aspekte ins Gewicht fielen und so teilweise zu unterschiedlichen Vorschlägen der beiden Experten führten. In allen Fällen konnten über das zweistufige Vorgehen einvernehmliche Verwertungsvorschläge erarbeitet werden, die in Zukunft mit den ehemaligen Zuwendungsempfängern intensiv beraten werden.

Um Unwägbarkeiten bei der praktischen Umsetzung der Verwertungsstrategien möglichst früh zu identifizieren, wurde ein Begleitgremium eingerichtet, das neben den Verbundpartnern aus den folgenden Behörden und Verbänden besteht:

- Deutsches Institut für Bautechnik
- Bundesanstalt für Straßenwesen
- Deutsche Bauchemie E. V.
- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V.
- Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V.
- Bundesvereinigung Mittelständischer Bauunternehmen e. V.
- VDI Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik

Die Zwischenergebnisse werden jährlich im Begleitgremium beraten, wobei die Chancen und Risiken aufgeführt werden sowie die weitere Vorgehensweise festgelegt wird.

### 3.3 Projektbegleitung in HighTechMatBau

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert mit der Bekanntmachung HighTechMatbau Forschungsprojekte zum Thema „Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen“. Neue Werkstoffe sind zentraler Baustein zur Lösung von Fragen der Energieeffizienz, des Klimaschutzes, aber auch für eine nachhaltige Mobilität und Versorgungssicherheit. Mit der Entwicklung neuer Werkstoffe sollen einerseits die Lebensqualität in deutschen Städten gesteigert und neue Bauteilfunktionalitäten ermöglicht werden. Andererseits sollen innovative Technologien die deutsche Wirtschaft stärken. Mit neuen Werkstoffen sollen Innovationspotenziale für:

- multifunktionale Verkehrswege,
- eine intelligente Gebäudetechnik und
- neue Instandhaltungs-/Instandsetzungskonzepte erschlossen werden.

Zur Beschleunigung des Verwertungsprozesses soll das Projektkonsortium WiTraBau die Forschungsvorhaben begleiten. Prinzipiell soll eine ähnliche Vorgehensweise wie bei NanoTecture verfolgt werden. Gemeinsam mit den Zuwendungsempfängern sollen anhand des Arbeitsplans Ergebnisse definiert und geeigneten Erkenntnisstufen und Verwertungsoptionen zugeordnet werden.

## 4 Weitere Vorgehensweise

Auf Basis der ausgewählten Verwertungsoptionen sollen gemeinsam mit den Zuwendungsempfängern projektbezogene Workshops durchgeführt werden. Die bereits erarbeiteten Verwertungsstrategien werden den NanoTecture-Konsortien vorgestellt und die bereits durchgeführten Verwertungsschritte ggf. ergänzt. Im Rahmen der Projekte aus HighTechMatBau sollen in Abstimmung mit den Zuwendungsempfängern geeignete Verwertungsstrategien erarbeitet werden. Die Verbundpartner aus WiTraBau werden anschließend die Verwertungswege vorbereiten und dokumentieren.

Zukünftig werden die Projekte auf der Internetseite [www.hightechmatbau.de](http://www.hightechmatbau.de) vorgestellt, die als Informationsplattform für alle Interessenten genutzt werden kann.

## 5 Zusammenfassung

Das BMBF geht den begrüßenswerten Weg, die Entwicklung innovativer Technologien ganzheitlich zu unterstützen. Hierbei stehen nicht mehr nur die Forschungsaktivitäten an Werkstoffen und Technologien im Fokus der Förderer, sondern auch die aktive Unterstützung des Technologietransfers in die Praxis.

Durch die gewählte strukturierte Vorgehensweise soll eine Evaluierung der Verwertungsmöglichkeiten der Projektergebnisse aus NanoTecture und HighTechMatBau durch die Verbundpartner aus WiTraBau ermöglicht werden, wobei alle Verwertungsmöglichkeiten auszuschöpfen sind. Dies soll durch die Aufgliederung der Projekte in Einzelergebnisse und einer Zuordnung zu geeigneten Verwertungsoptionen erreicht werden.

Auf dieser Basis werden gemeinsam mit den Zuwendungsempfängern die Verwertungsstrategien unter Berücksichtigung der bisherigen Verwertung sowie der eigenen Wünsche und Ideen der Zuwendungsempfänger erarbeitet.

Es findet keine Bewertung der Forschungsergebnisse statt, sondern der Fokus des Transferprojekts liegt in der Begleitung und damit Beschleunigung bzw. Optimierung der Verwertung.

## **6 Danksagung**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 13N13541 bis 13N13546 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Konsortium dankt dem BMBF für die Förderung und dem VDI Technologiezentrum für die bisherige reibungslose Zusammenarbeit.

# R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation

*R*-BETON

Dipl.-Ing. Raymund Böing  
*HeidelbergCement AG Leimen*

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell,  
Dipl.-Ing. Julia Scheidt  
*TU Kaiserslautern*

## 1 Motivation und Gesamtziel

Die Verringerung des Rohstoff- und Materialverbrauchs gehört zu den zentralen Herausforderungen unserer Zeit. Ein effizienter Umgang mit natürlichen Ressourcen ist eine zentrale Forderung, die auch die Wettbewerbsfähigkeit eines Sektors beeinflusst. Gerade das Bauwesen ist aufgrund seines hohen Materialbedarfs eine Schlüsselwirtschaft zur Erzielung spürbarer Fortschritte auf diesem Gebiet. Bei einer jährlichen Betonherstellung in Deutschland von ca. 100 Mio. m<sup>3</sup> besteht ein großes Optimierungspotenzial. Etwa die Hälfte dieser Menge wird als Konstruktionsbeton verbaut. Der übrige Teil wird für technisch weniger anspruchsvolle Betone in Betonwaren, Verdämmung im Bergbau etc. verwendet.

Im Allgemeinen fallen bei Bautätigkeiten große Mengen an mineralischen Abfällen (Beton, Mauer-, Ziegel-, Kalksandsteine etc.) an, die nach entsprechender Aufbereitung als RC-Gesteinskörnung in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden und somit einen Beitrag zur Schonung von natürlichen Ressourcen leisten können.

Der Einsatz von RC-Gesteinskörnung in der Betonproduktion wird in der DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen“ geregelt. Bisher kommt diese Richtlinie nur in begrenztem Umfang zur Anwendung. Anforderungen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und eng begrenzte Stoffmengen sowie der Ausschluss von feiner RC-Gesteinskörnung ( $\leq 2$  mm) jeglicher Art schränken die Verwendbarkeit von RC-Gesteinskörnung in der Betonproduktion stark ein.

Während aufgrund vorgenannter Randbedingungen sich der Einsatz von R-Beton in Deutschland auf wenige Pilotprojekte beschränkt, liegen sowohl in der benachbarten Schweiz als auch den vergleichsweise rohstoffarmen Niederlanden mittlerweile viele positive Erfahrungen mit der hochwertigen Verwendung von RC-Gesteinskörnungen im Beton vor. Die umfangreichen Anwendungen aus der Schweiz zeigen, dass sich bei entsprechenden Randbedingungen bis zu 90 % des gesamten Betonbedarfs aus dem konventionellen Hochbau über R-Betone abdecken lassen. Die Untersuchungen aus der Schweiz belegen darüber hinaus, dass auch R-Betone hergestellt und verwendet werden können, die nahezu aus 100 % RC-Gesteinskörnung besteht. Inwieweit diese Erfahrungen auf die Verhältnisse in Deutschland übertragen werden können, ist zu überprüfen.

Auch die Entwicklungen im Bereich der Europäischen Betonnorm FprEN 206: 2013 (Abschnitt 5.3.1 und Annex E.3) belegen durch die Aufnahme von RC-Gesteinskörnung, dass dieser mineralische Wertstoff eine wichtige und unverzichtbare Ressource für die zukünftige Betonproduktion darstellt.

Vor diesem Hintergrund haben sich die Verbundpartner die Frage gestellt, wieso sich in Deutschland, einem der innovativsten Länder Europas und der Welt, RC-Gesteinskörnung in der Betonproduktion als ressourcenschonende Ausgangstoffalternative noch nicht etabliert hat. Die Antwort liegt in den zahlreichen restriktiven Randbedingungen begründet, die für eine praxisgerechte Verwendung kaum einen Anreiz, aber eine Reihe von Hemmnissen bieten. Erklärtes Ziel der Verbundpartner ist es, die

aufgezeigten Schwierigkeiten auf der Basis von wissenschaftlichen Untersuchungen auszuräumen und somit dazu beizutragen, dass in der Zukunft der Einsatz von RC-Gesteinskörnung – wenn bei ganzheitlicher Betrachtung sinnvoll – eine breite praktische Anwendung erfährt. Nicht zuletzt sollen die Ergebnisse dazu dienen, eine dem neuen Stand der Technik entsprechende Anpassung der Normen und Richtlinien vorzunehmen.

## **2 Industrielle und gesellschaftliche Relevanz**

Schon heute stehen in Ballungsräumen, auf die sich die Bautätigkeit zunehmend konzentriert, natürliche Gesteinskörnungen nicht mehr in unbegrenztem Umfang zur Verfügung. Darüber hinaus ist in diesen Ballungsräumen in Zukunft mit größeren Mengen an mineralischen Bauabfällen zu rechnen. Die Herstellung von Beton mit RC-Gesteinskörnung weist damit sowohl ökologische und ökonomische als auch ggf. logistische Vorteile auf, da auf die Altbaustoffrecyclingunternehmen als Bezugsquelle zurückgegriffen werden kann. Selbst der Einsatz von mobilen Anlagen zur Herstellung von RC-Gesteinskörnungen stellt heute kein größeres verfahrenstechnisches Problem dar. Insofern sind die Voraussetzungen dafür gegeben, eine bislang für untergeordnete Anwendungen eingesetzte Ressource einer hochwertigen und zukunftssträchtigen Verwendung zuzuführen.

Für die angestrebte Bauweise mit R-Beton besteht ein Anwendungspotenzial in nahezu allen Bereichen der Betonbauweise (ca. 90 % aller Betonanwendungen sind denkbar). Keine andere Bauweise dürfte für Deutschland eine vergleichsweise richtungsweisende Massenwirkung entfalten können.

Das Vorhaben deckt die gesamte Wertschöpfungskette von der Baustoffherstellung über die -verarbeitung bis zum Praxisnachweis ab (Verwertung der Altbaustoffe, Herstellung von RC-Gesteinskörnungen, hochwertige Verwendung der RC-Materialien in der Zement- und Betonherstellung).

Das Konsortium ist durch Industriepartner (HeidelbergCement AG, BASF, Scherer + Kohl, Zement- und Transportbetonindustrie) und Forschungsstellen im universitären sowie außeruniversitären Bereich (RWTH Aachen, TU Kaiserslautern, ifeu, VDZ) hervorragend aufgestellt.

Der Stoffstrom der Bau- und Abbruchabfälle ist mit einem Anteil von etwa 60 % des Gesamtabfallaufkommens der mengenmäßig bedeutsamste Stoffstrom der Recycling- und Entsorgungsbranche. Die Beschäftigtenzahl in diesem Bereich wurde für das Bezugsjahr 2006 auf ca. 37.200 geschätzt bei einem Umsatz von 11,1 Mrd. EUR (ca. 30% bezogen auf gesamten Umsatz). Diese Zahlen unterstreichen sowohl die industrielle als auch die gesellschaftliche Relevanz des Themas Wertstoff, Recycling und Wiederverwendung.

Die Verringerung des Rohstoff- und Materialverbrauchs gehört zu den zentralen Herausforderungen unserer Gesellschaft. Der effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen ist eine zentrale Forderung, die auch die Wettbewerbsfähigkeit positiv beeinflusst. Zur Erfüllung dieser Zielsetzung wird das Projekt einen wesentlichen Beitrag leisten.

Unter den Gesichtspunkten der Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit sind weitgehend vollständig geschlossene Stoffkreisläufe zu realisieren. Hierbei ist eine möglichst hochwertige Verwertung der Altbaustoffe, d.h. eine Verwertung, die den spezifischen wertgebenden Eigenschaften der Altmaterialien entspricht, einer untergeordneten Anwendung vorzuziehen. In Rheinland-Pfalz wurde hierzu bereits eine Vereinbarung „Bündnis Kreislaufwirtschaft auf dem Bau“ aller beteiligten Kreise unterzeichnet. Insbesondere dies ist neben der Anwendungserweiterung ein zentrales Ziel des Vorhabens.

Die hochwertige Verwertung von Abfällen jeglicher Art ist nach einem langen Entwicklungsprozess ein wesentlicher Bestandteil unseres fortschrittlichen Gemeinwesens geworden. Diesem Vorbild sollte auch mit Altbaustoffen gefolgt werden, um R-Beton zum Werkstoff der nächsten Generation zu machen.

### **3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele wurden definiert:

Prognose praxisgerechter Stoffmassenströme unter Berücksichtigung der vorhandenen Rückbaumaterialien und der herstellerseitigen Möglichkeiten zur Optimierung des Recyclingprozesses

- Nachweis der Verwendbarkeit von feiner RC-Gesteinskörnung zur Herstellung von Zement und Beton
- Überprüfung der vorhandenen Einschränkungen durch das Regelwerk (Typenauswahl, Mengenbegrenzung, Festigkeitsgrenzen, ...) unter Berücksichtigung moderner Betontechnologie mit dem Ziel, den Anwendungsbereich und damit die Akzeptanz deutlich zu erweitern. Angestrebt wird eine weitgehend vollständige Verwendung von RC-Gesteinskörnungen (geschlossener Baustoffkreislauf)
- Erforschung und Projektierung von speziellen hochleistungsfähigen Betonzusatzmitteln für RC-Gesteinskörnungen
- Kontrolle der Bemessungsansätze nach Eurocode 2 im Hinblick auf die Erweiterung der Anwendungsgrenzen. Festlegung von abweichenden Nachweisformaten für besondere Anwendungsbereiche
- Erarbeitung einer praxisgerechten Vorgehensweise zur zielsicheren Vermeidung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion sowie zur Sicherstellung der Umweltverträglichkeit
- Berücksichtigung neuer Methoden zum Frischbetonrecycling und Überprüfung der Anwendungsgrenzen
- Ökologische Bewertung der verschiedenen Entwicklungsschritte: Vergleichende Ökobilanz aus Sicht der Zement-, der Beton- und der RC-Gesteinskörnungsherstellung
- Nachweis aller relevanten Arbeitsschritte im Praxistest

Anpassung des Regelwerks zur Anwendung von R-Beton auf der Basis der Ergebnisse des Projekts

### **4 Schwerpunkte, Arbeitspakete und Vorgehensweise**

Auf der Basis der beschriebenen Problemstellung und der formulierten Zielsetzungen wurden drei Schwerpunkte mit insgesamt 13 Arbeitspakete (AP) zusammengestellt, wobei AP 13 der Projektkoordination dient.

- I Konzeptionierung der neuen Werkstoffe (AP 1 bis AP 6)
- II Praxisanforderungen an die neuen Werkstoffe (AP 7 bis AP 9)
- III Ökobilanz, Praxistest und Transfer (AP 10 bis AP 12)

Die Vernetzung der einzelnen Arbeitspakete ist überaus vielfältig und kann bezüglich der direkten Abhängigkeiten Bild 1 entnommen werden. Projektpartner und Teilvorhaben gehen aus Tabelle 1 hervor.

| Teilvorhaben (Nr. / Titel) |  | Projektpartner    |
|----------------------------|--|-------------------|
| 1                          | 2  | 3                 |
| TV 1                       | Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme unter Berücksichtigung des prognostizierten Aufkommens und Ökobilanzierung im Bereich der Betonanwendung sowie der RC-Gesteinskörnungsherstellung  | ifeu              |
| TV 2                       | Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme aus Sicht der RC-Gesteinskörnungsherstellung und Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Anpassung   | Scherer+Kohl      |
| TV 3                       | Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der Bemessungsansätze nach EC 2  | TU Kaiserslautern |
| TV 4                       | Entwicklung von neuen hochleistungsfähigen R-Zusatzmitteln für die Herstellung von R-Beton   | BASF              |
| TV 5                       | Verwendung von feinen Gesteinskörnungen bei der Zementherstellung, Ökobilanzierung aus Sicht des Zement- und des Betonherstellers und Entwicklung praxistauglicher Ansätze zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von RC-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung | VDZ               |
| TV 6                       | Frischbetonrecycling und Entwicklung von Verfahren zum praxisgerechten Umgang mit umweltrelevanten Merkmalen   | RWTH Aachen       |
| TV 7                       | R-Beton aus Sicht der praxisgerechten Anwendung und Koordination des Gesamtvorhabens   | HeidelbergCement  |

Bild 1: Schwerpunkte, Arbeitspakete und Vernetzung der Arbeitspakete

Fig. 1: Thematic focus, work packages and networking

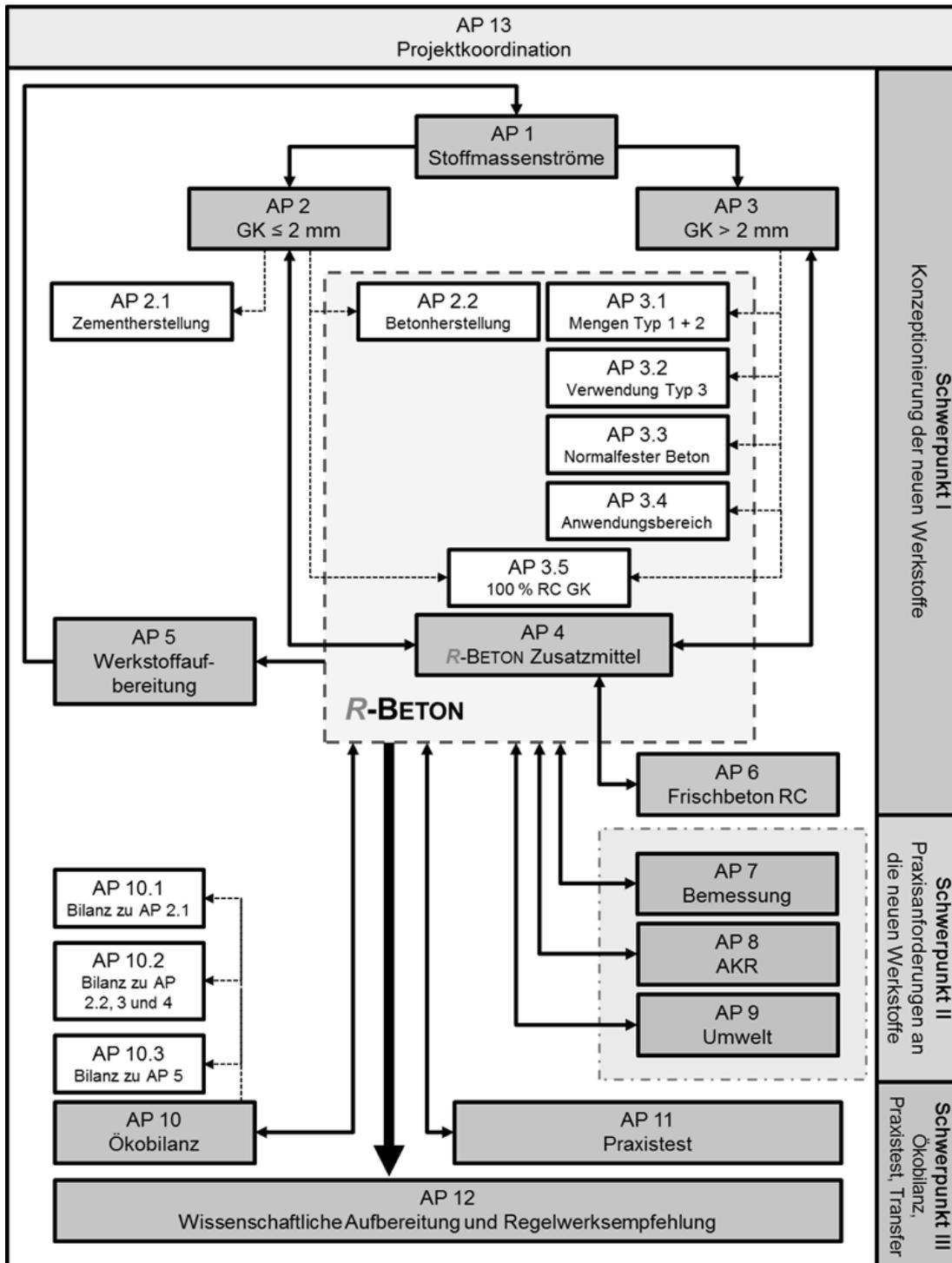


Bild 1: Schwerpunkte, Arbeitspakete und Vernetzung der Arbeitspakete

Fig. 1: Thematic focus, work packages and networking

## 5 Kontaktdaten

Projektkoordinator:

Dipl.-Ing. Raymund Böing

HeidelbergCement AG

Entwicklung und Anwendung; Ressortleiter Betontechnologie Transportbeton

Oberklamweg 6, 69181 Leimen

Telefon 06221/481-13797 / Telefax 06221/481-13757

Email [raymund.boeing@heidelbergcement.com](mailto:raymund.boeing@heidelbergcement.com)

Homepage des Verbundvorhabens: <http://www.r-beton.de/>

## 6 Aktuelle Regelwerke

- /1/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe September 2010
- /2/ DIN EN 206-1:2001-07 Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000 [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- /3/ DIN 1045-2: 2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- /4/ DIN EN 1008: 2002-10 Zugabewasser für Beton – Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wassers, als Zugabewasser für Beton; Deutsche Fassung EN 1008:2002 [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- /5/ DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1; Ausgabe September 2010, [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- /6/ DIN EN 12620: 2008-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008, [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- /7/ DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie) Ausgabe Oktober 2013, [www.beuth.de](http://www.beuth.de)

# Elektrodynamisch fragmentierte und recycelte Puzzolane für zementäre Bindemittel

DYFRACEM

Sabine Mutke  
*Dyckerhoff GmbH*

## 1 Zementäre Bindemittel

Zement ist weltweit das wichtigste Bindemittel zur Errichtung zuverlässiger, dauerhafter und umweltfreundlicher Betonbauteile und –werke /1/. Der jährliche Zementverbrauch lag 2013 bei etwa 4 Mrd. t /2/ und wird in den kommenden Jahren, insbesondere in den Schwellenländern, weiter steigen. Daher kommt der umweltverträglichen Zementherstellung eine enorme globale Bedeutung zu.

Die Zementindustrie reagiert seit Jahren z. B. durch den Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen oder durch Entwicklung leistungsfähiger Bindemittel mit reduziertem Klinkeranteil auf diese Herausforderung. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Hüttensande oder Flugaschen, welche dem Zement zur Reduzierung des Klinkeranteils zugemahlen werden, starken Schwankungen unterliegt. Die Verfügbarkeit natürlicher Puzzolane als Zumahlstoff ist regional unterschiedlich und begrenzt. Daher stellt die potentielle Verwendung synthetischer Puzzolane aus den Schlacken der überall im Bundesgebiet vorhandenen Müllverbrennungsanlagen eine wichtige Ergänzung zur Versorgung mit ressourcenschonender Ersatzrohstoffen oder Zumahlstoffen dar. Gleichzeitig werden die Schlackendeponien entlastet und ein wesentlicher Beitrag zur Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) geleistet. Dies ist wichtig in Anbetracht dessen, dass bei dem derzeitigen Schlacken-Aufkommen die Deponien nur noch für die nächsten 20 Jahre reichen werden. Deshalb wird nach technischen Lösungen gesucht, um das Schlackenvolumen zu verringern bzw. die vorhandenen Deponien rückzubauen im Sinne von „Urban Mining“. Eine potentielle Lösung bietet die Technologie der elektrodynamischen Fragmentierung, mit der Verbundmaterialien selektiv aufgetrennt werden können. Diese Technologie soll in diesem Projekt angewendet werden, um aus Müllverbrennungssaschen den hydraulischen Schlackeanteil effizient zu selektieren und im Baubereich der Wiederverwertung zuzuführen.

## 2 Hausmüllverbrennungssaschen

In Deutschland fallen jährlich ca. 5 Mio. t Hausmüllverbrennungssaschen (HMVA) u. a. mit amorphen Schmelzprodukten an, die ähnlich wie Zement hydraulisch reagieren können. Jedoch enthalten HMVA auch anorganische Reste, metallisches Aluminium und Eisen sowie einen hohen Gehalt an betonschädigenden Salzen und Schwermetallen, die eine Verwendung von HMVA als Baumaterial erschweren bzw. in Teilbereichen verhindern. Zudem schwanken die Zusammensetzungen der einzelnen HMVA-Schlacken je nach Verfahren, Anlage und Müllzusammensetzung. Deshalb ist HMVA-Schlacke trotz der hohen hydraulischen Reaktivität nur bedingt in Baustoffen verwendbar. Ein Großteil der HMVA-Schlacken wird nach einer 3-wöchigen Lagerung im Untertage- oder Straßenbau als Füllmaterial eingesetzt bzw. als „Deponiebaustoff“ verwendet und damit dem Stoffkreislauf entzogen.

### 3 Elektrodynamische Fragmentierung

Das Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung beruht darauf, dass ultrakurze elektrische Impulse einen Festkörper bevorzugt entlang von Phasengrenzen durchlaufen und dort die Matrix schwächen bzw. zerstören. Dadurch ist im Gegensatz zur klassischen mechanischen Aufbereitung durch Mahlung eine selektive Zerkleinerung von Materialgemischen und eine Auftrennung in seine einzelnen Bestandteile möglich.

Die Gruppe Betontechnologie des Fraunhofer IBP beschäftigt sich mit innovativen Recyclingverfahren /3/ wie der elektrodynamischen Fragmentierung u. a. zur Auftrennung von MVA-Schlacken. Primäres Ziel ist es, diese Schlacken selektiv in die einzelnen Phasen aufzutrennen, um z. B. Eisenschrott und NE - Metalle zurückzugewinnen. Bei diesen Arbeiten ist es der Arbeitsgruppe in einem ersten Schritt gelungen, diese Schlacken in ihre Bestandteile zu zerlegen. Nun sollen die entstehenden Gemische in die verschiedenen Stoffgruppen wie Glas, Keramik und Schmelzprodukte selektiert werden, um sie als hochwertige Rohstoffe wieder verfügbar zu machen.

In einem Fraunhofer-intern geförderten Projekt „Märkte von übermorgen: Molecular Sorting“ konnte bereits gezeigt werden, dass sich MVA-Schlacken mithilfe der elektrodynamischen Fragmentierung effektiv in einzelne Mineralphasen auftrennen und separieren lassen (Bild 1, /4/). Zudem war auch die hydraulische Aktivität in den Schmelzprodukten nachweisbar (Bild 2, /5/).

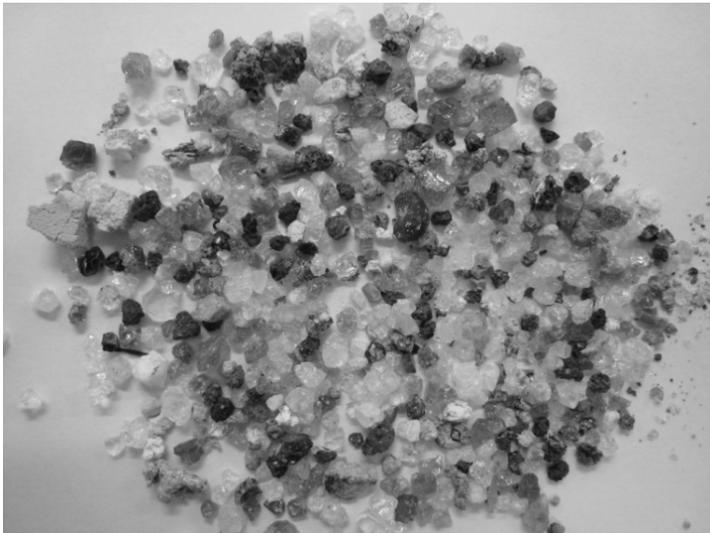


Bild 1: Grobfraktion ( $> 2$  mm) der fragmentierten MVA-Schlacke, enthält hauptsächlich Bruchstücke aus Glas, Keramik und Schmelzprodukten (im Bild als schwarze opake Körner erkennbar).

Fig. 1: Coarse fraction ( $> 2$  mm) of the fragmented MSWI ash, contains mainly fragments of glass, ceramic and melted products (visible in the picture as black opaque grains).

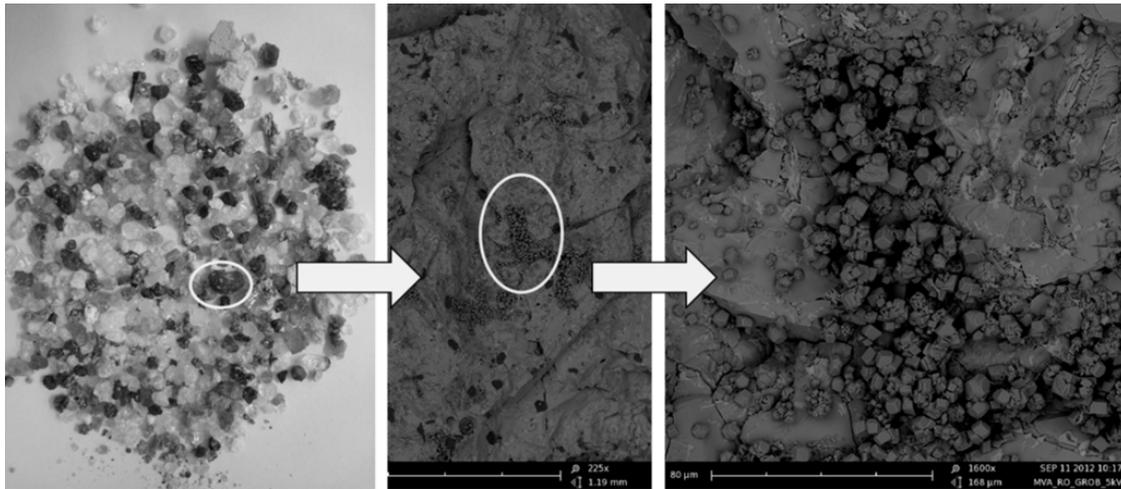


Bild 2: In den Schmelzprodukten sind typische Phasen der Zementhydratation wie Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) und  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nachweisbar.

Fig. 2: The melted products show the typical phases of cement hydration like Calcium-Silicat-Hydrate (CSH) and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

#### 4 Projektziel

Aufbereitete MVA-Schlacken werden schon heute als Körnung in Tragschichten oder als Deponieersatzbaustoff eingesetzt. Die Aufbereitung der Schlacken erfolgt dabei rein mechanisch über Magnet- und Wirbelstromabscheider oder mittels Prallmühle /6/. Bisherige Untersuchungen zu deren Einsatz in Baustoffen zeigten das hydraulische Potential, wobei aufgrund der fehlenden sortenreinen Sortierung der Einsatz jedoch problematisch blieb /7/. Durch die in diesem Vorhaben eingesetzte elektrodynamische Fragmentierung soll ein höherer Aufschlussgrad für Metalle und NE-Metalle erzielt werden. Das gilt insbesondere für die Kornfraktion  $< 6\text{mm}$ , für die es derzeit kein effektives Aufschlussverfahren gibt. Ziel ist es, die hydraulisch aktiven Phasen der abgetrennten Schmelzprodukte auf ihre Eignung als Zumahlstoff in Portlandzement zu prüfen. Denkbar ist ebenfalls der Einsatz als Gesteinskörnung in Mörtel bzw. Beton oder als Rohstoff für die Zementproduktion. Gänzlich neu ist der Ansatz, mithilfe der Fragmentierung betonschädigende Salze wie Chloride und Sulfate von den Schlacken abzutrennen, um die Anforderungen an die Verwendung in Bauprodukten zu erfüllen.

Die Projektarbeiten tragen im Erfolgsfall dazu bei, die Menge an zu deponierender MVA-Schlacken erheblich zu reduzieren. Stattdessen können die in den Schlacken enthaltenen Wertstoffe durch die Fraktionierung und Sortierung wiederverwertet und in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Dies bewirkt eine Schonung von Ressourcen, da natürliche Rohstoffe eingespart und die Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen abgemildert werden kann.

Im Erfolgsfall eröffnen die Projektarbeiten eine Alternative für bereits vorhandene Zumahlstoffe. Damit kann der Klinkerfaktor in zementären Bindemitteln weiter reduziert und eine weitere Einsparung von Energie und  $\text{CO}_2$ -Emissionen erreicht werden. Daraus resultiert eine stärkere Unabhängigkeit von dem zeitweise stark fluktuierenden Angebot an Hüttensand und Flugasche für die Produktion von Bindemitteln.

## 5 Literatur

- /1/ vdz – Tätigkeitsbericht 2009 – 2012, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 2012.
- /2/ Homepage des Cembureau: <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>, (Online, Stand 27.07.2014)
- /3/ V. Thome et al., „Recycling 3.0“ in RECYCLING MAGAZIN, S. 25-27, Juni 2013
- /4/ Homepage Projektseite „Molecular Sorting“ der Fraunhofer-Gesellschaft: <http://www.molecular-sorting.fraunhofer.de> (Online)
- /5/ Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau – HMVA. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln (2005).
- /6/ Y. Hosokawa et al., „Recycling molten Slag from Waste to Concrete Products and Construction Materials in Japan – a Case Study Report“, 29th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore (2004).
- /7/ V. Thome et al., „Elektrodynamische Fragmentierung – die Möglichkeit einer effizienten Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken“, RECYCLING MAGAZIN, S. 19 - 21, Jan. 2013

# **Neue Dämm- und Verfüllstoffe aus Schaumgips – energieeffizient, ökologisch, unbedenklich –**

SULFOAM

Andreas Hübner

*Leitung Produktmanagement  
CASEA GmbH*

Dr.-Ing. Saskia Nowak

*Bauhaus-Universität Weimar  
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
Professur "Werkstoffe des Bauens"*

Dipl.-Ing. Heike Dreuse

*Forschungskordinatorin Abteilung Baustoffe  
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar  
(MFPA Weimar)*

## **1 Beschreibung des Projektes**

### **1.1 Problemstellung**

Dämmstoffe auf Basis von EPS (expandiertes Polystyrol) sind Standard im europäischen Raum. Gemäß GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie) wurden 2010 alleine in Deutschland 9.583.000 m<sup>3</sup> expandiertes Polystyrol und 15.800.000 m<sup>3</sup> Mineralwolle verbaut.

Für Fußbodenheizungen werden pro Jahr in Deutschland ca. 90-95 Millionen lfd. Meter Fußbodenheizungsrohr eingesetzt. Umgerechnet ergibt das eine Bodenfläche von ca. 15 Millionen m<sup>2</sup>, für die ca. 12-13 cm EPS-Platten zur Dämmung und Rohbodenausgleich eingesetzt werden. Rund 1,9 Millionen m<sup>2</sup> sind somit allein der Bedarf für Dämmplatten im Fußbodenbau bei Warmwasserfußbodenheizung.

Bei dem gegenwärtigen Stand der Technik finden wir auch heute in unseren Gebäuden eine weite Verwendung von Dämmmaterialien aus expandiertem Polystyrol (EPS). Diese sind problematisch im Brandfall wegen der Freisetzung von gesundheitsgefährdenden Rauchgasen, kaum recyclebar, in der Produktion sehr energie- und ressourcenintensiv sowie in der Anwendung mit hohem Arbeitsaufwand verbunden. Mineralische Alternativen zeigen bisher kaum vergleichbare Eigenschaften und haben sich bisher nicht durchgesetzt, obwohl es an möglichen Anwendungsfällen nicht mangelt.

Dazu zählt insbesondere die energetische Sanierung von Dachgeschossdecken unter Kaltdächern, was auf etwa 80 % der Altbauten zutrifft. Einer vordringlichen Lösung bedarf auch die materialverträgliche Wiederherstellung sulfathaltiger Mauerwerke, bei welcher unwiederbringliche Verluste kulturhistorisch bedeutsamer Bausubstanz durch fehlerhafte Sanierungsansätze aufgrund falscher Materialauswahl (Zement) drohen. In Neubauten ergibt sich ein weites Anwendungsfeld im klassischen Wärme- und Brandschutz, hier insbesondere als Dämmung unter Estrichen und in Geschossdecken. Die Wohnklimaregulierung mit unbedenklichen, recyclingfähig und schadstoffreduzierenden Baustoffen gewinnt vermehrt an Bedeutung.

Alternativen auf Basis mineralischer Rohstoffe wie im Projekt „SULFOAM“ angedacht, werden derzeit bereits auf zementärer Basis angeboten, haben sich aufgrund der Kostenrelation zu EPS und dem erhöhten Aufwand für Mischen und Einbau bisher noch nicht durchgesetzt. Erheblich bessere Chancen hätte ein Produkt, welches deutlich unter den Dämmwerten von EPS (0,030-0,035 W/m<sup>2</sup>\*K)

liegen könnte. Zusätzlich zum Brandschutz ergäbe sich somit ein errechenbarer Vorteil in der Dämmwirkung und damit beim Thema Energieverbrauch im Nutzungszustand.

## 1.2 Ziele des Projektes

Das Hauptziel des Projektes besteht in der Entwicklung des innovativen Schaumbaustoffes auf Calciumsulfatbasis und der dazugehörigen Applikationstechnologie. Der entwickelte Baustoff soll seine Anwendung insbesondere in folgenden Bereichen finden:

- Erhöhung des Wärmeschutzes in Wohn- und Wirtschaftsräumen als energieeffiziente Wärmedämmung zur Einsparung wertvoller Ressourcen und zur Umweltschonung
- Erhöhung des Brandschutzes bis zu der Feuerwiderstandsklasse F180
- Instandhaltung, Sanierung und Aufwertung vorhandener Bausubstanz aus statischer und bauphysikalischer Sicht
- materialverträgliche Sanierung sulfathaltiger Bauwerke und Bauteile (insbesondere Verfüllung mehrschaliger Mauerwerke zur statischen Ertüchtigung)
- Wohnklimaregulierung mit physiologisch unbedenklichen, recyclingfähig und schadstoffreduzierenden Baustoffen

Mit der Erforschung und Erarbeitung eines geschäumten Calciumsulfatbaustoffes und der dafür geeigneten Applikationstechnologien kann der Nachfrage nach verbesserten Baustoffen bzw. Materialien und deren Einsatz entgegen gekommen werden. Intelligente Instandhaltungskonzepte sollen u.a. Energie- und Masseströme reduzieren, funktionale Bindemittel beinhalten und recyclingfähig sein. Das Projekt SULFOAM spiegelt in seiner gesamten Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zur Anwendung, wie Verbesserung von Wärmedämmung und Brandschutz, diese Anforderungen wieder. Im Projekt werden Beiträge kleiner und mittelständiger Unternehmen (KMU), von Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Großindustrie einfließen. Die Projektkoordination wird von der Fa. CASEA GmbH (Industrie) geleistet. Nach Beendigung des Projektes wird ein gesamtwirtschaftlicher Nutzen erwartet.

## 1.3 Arbeitsplan

CASEA GmbH, das antragstellende Unternehmen, widmet sich als Hersteller der verschiedensten Gipsbindemittel in übergeordneter Weise der Abstimmung des Gipsbindemittels für den Einsatz im Schaumbaustoff. Außerdem obliegt es CASEA GmbH, die notwendigen Zusatzmittel auszuwählen und zu beschaffen.

Die Abstimmung der Gipsbindemittel zielt auf die radikale Reduzierung des Wasseranspruches ab. Die wichtigsten bindemittelseitigen Maßnahmen zum Erreichen des Forschungszieles sind die künstliche Alterung und die Optimierung des Kornbandes. Es werden zwei Varianten von Alterungsmaßnahmen im kleintechnischen Maßstab auf ihre Wirksamkeit hin überprüft. Variante 1 ist der mittels Druckluft erzielte horizontale Transport des Materials innerhalb einer Rohrleitung in normaler Atmosphäre. Die daran anschließende Variante 2 entspricht einem kleintechnischen Bau eines Aggregates, dessen Prinzip einem Fließbettkühler nachempfunden wird. Beide Versuchsaufbauten („Luftförderung“ und „Fließbettkühler“) dienen als Demonstratoren und werden für verschiedene Bindemittel getestet. Die Kornbandoptimierung soll ein optimales „Rollverhalten“ bei minimalen Benetzungsansprüchen bewirken. Für die Konzeptionierung und Umsetzung eines Aggregates („Alterungsdemonstrator“) ist die Firma AML-Anlagentechnik betraut.

Die MFPA hat nach ersten Tastversuchen, Schaumgips mit dem zweikomponentigen Verfahren herzustellen, die prinzipielle Machbarkeit herausarbeiten können. Die Hauptaufgabe des Projektpartners besteht darin, die Abstimmung von Schäumen sowie von Schaumbaustofffrischmörteln vorzunehmen. Hierbei wird einerseits herausgefunden, welche Schaumdichten und welche Verhältnisse von Schäumen zu Bindemittelleimen geeignet sind, um bei größtmöglicher Porosität die erforderlichen Festigkeiten und andere physikalische Eigenschaften zu erzielen. Weitere zu erzielende Kenngrößen sind gute Verarbeitbarkeiten bei fließfähiger Konsistenz,

Entmischungs-, Matrix- und Schaumstabilitäten sowie homogene Verteilungen der Luftblasen, aber auch Haftzugfestigkeiten, Biegezugfestigkeiten und geringe Schwindneigungen bis zu leichten Quellverhalten. Diese und andere Kenngrößen werden entsprechend der angedachten Anwendungen in ihrer Größenordnung festgelegt und Referenzwerte bestimmt. Die durch die MFPA abgestimmten Basismischungen werden durch Modifizierung weiter angepasst und dienen als Referenz für alle weiteren Mischungskonzipierungen. Die MFPA führt sämtliche Laboruntersuchungen (manuelle Mischungen) am Zweikomponentensystem bis zur erfolgreichen Umsetzung zur maschinellen Verarbeitung durch. Die MFPA trägt außerdem die Verantwortung für alle kleintechnischen Versuche zur (manuellen) Herstellung der Schaumbaustoffe insbesondere in den ersten 25 Monaten des Projektes. Weiterhin obliegen ihr alle Frisch- und Festmörteluntersuchungen sowie die Herstellung von Schaumbaustoff-Probekörpern zur weiteren Analyse am FIB. Zu den Mörteluntersuchungen im plastischen und festen Zustand gehören Untersuchungen nach aktuellen Normen und Richtlinien, wie Konsistenz und Luftporengehalt, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit, Schwinden und Quellen (mit Messzapfen). Auch müssen Prüfmethode nach eigenem Standard, wie Schwindrinnenmessung und Methoden zur Beurteilung des Verarbeitungsverhaltens und der Frischmörtelstabilität, entwickelt werden. Nicht zuletzt gehört zu den Aufgaben der MFPA die Beprobung und Bewertung der Demonstrationsstrecken mit Schaumbaustoffen für Wärmedämmung und Brandschutz sowie Mauerwerksverfüllungen und Sulfatverträglichkeiten. Besonderes Interesse hinsichtlich der Zielstellung des Projektes gilt der Überprüfung des Feuchtehaushaltes der applizierten Schaumbaustoffe, bzw. des Austrocknungs- oder Wasserbindungsverhaltens. Diesbezüglich werden durch die MFPA spezielle Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung der zeitlichen Veränderungen von Feuchtprofilen an den Schaumbaustoffen durchgeführt. Hierzu werden vom Projektpartner Fa. Bennert sowohl großformatige Probekörper mit variierender Dicke als auch Wandaufbauten hergestellt. Genutzt werden die durch die MFPA erarbeiteten Vorzugsmischungen. Überdies übernimmt die MFPA die Simulation von Feuchteprofilen für unterschiedliche Anwendungen mit den Softwareprogrammen WUFI und DELPHIN.

Das FIB ist universitärer Partner im Verbund und während des gesamten Projektes für die Durchführung der Analytik der Materialien verantwortlich. Dazu gehört die Bindemittelcharakterisierung, u.a. durch Bestimmen der Einstreumenge, der spezifischen Oberfläche, die Mineralphasenanalyse und die Untersuchung des Hydratationsverhaltens. Außerdem führt das FIB sämtliche Materialanalysen der Festkörperproben durch, welche die MFPA als Prüfkörper hergestellt oder als Proben oder Bohrkerne entnommen hat. Dazu gehören u.a. lichtmikroskopische Untersuchungen zur Beurteilung der Poren im Schaumprodukt, Elektronenmikroskopie und quantitative Röntgenphasenanalyse. Das FIB ist außerdem wissenschaftlicher Berater der Firmen CASEA und AML bezüglich jeglicher Fragen zur Alterung. Des Weiteren wird vom FIB mittels statistischer Versuchsplanung (Programm: Design-Expert 8.0) die Variation der Mischungszusammensetzungen, insbesondere für die Untersuchungen der MFPA zur Erarbeitung der Vorzugsvarianten des Schaumproduktes, begleitet. Eine besondere Aufgabe des FIB's im Rahmen dieses Projektes ist die Untersuchung der Wechselwirkung von Schaumbildner und Fließmittel.

Die Fa. **Bennert** besitzt langjährige Erfahrungen in der Sanierung historischer Bauwerke mit sulfathaltigem Mauerwerk. In der ersten Projektphase werden Anforderungsprofile für die Verfüllmörtelsysteme aus unterschiedlichen Bestandssituationen erarbeitet. Als Basis werden bereits vorliegende Daten aus Bauzustandsbewertungen und Untersuchungen an ausgewählten Objekten dienen. Außerdem soll recherchiert werden, welche Schadensfälle oder besondere Bauwerkssituationen eine Nachstellung als Modellkörper oder als Versuchswand aufschlussreich sein können. Bereits im ersten Jahr sollen Praxistests zur Anwendung der geschäumten Calciumsulfat-Baustoffe als Verfüllmörtel durchgeführt werden. Darüber hinaus wird Bennert im Außenbereich Wände zu Demonstrationszwecken errichten. Sie werden abschnittsweise mit den verschiedenen Vorzugsvarianten der Schaumbaustoffe verfüllt, bzw. in noch festzulegender Art und Weise „sanier“ (z.B. Rissverfüllungen). So sollen die Verarbeitbarkeit, die Hohlraumpenetration, die Mörtelerhärtung sowie der Haftverbund an unterschiedlichen Altbaustoffen unter Realbedingungen untersucht werden. Außerdem erfolgt ein Einbau von Mess- und Überwachungstechnik in die Modellwände. Mit dieser Versuchsdurchführung soll insbesondere die Verträglichkeit der Schaumbaustoffe mit sulfathaltigem Mauerwerk nachgewiesen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt wird der Verfüllmörtel manuell gemischt

und mit der Applikationstechnik der Fa. Bennert eingebracht. Ein Innovationsziel des Projektes ist jedoch die vollständig maschinelle Verarbeitung insbesondere für den Einsatz als Verfüllmaterial.

An der Teststrecke mit Demonstrationswänden werden Instandsetzungssituationen, wie Hohlraumverfüllen, Abdichten und Rissverfüllung unter Einsatz einer maschinellen Herstellung und Einbringung getestet und untersucht. Für die Überwachung der eingebrachten Messtechnik, die Dokumentation und Probenahme ist Bennert ebenfalls verantwortlich. Dies gilt für die horizontale Einbringung der Wärmedämm- und Brandschutzschichten wie für die Verfüllungen. Beide prinzipiellen Anwendungsfälle erfordern unterschiedliche technische Voraussetzungen. Die technische Umsetzung soll gemeinsam mit Bennert unter Nutzung der Schaumbaustoffanlage, die im Vorhinein von VEP im Rahmen dieses Projektes konzipiert wird, erfolgen.

Für praxisnahe Untersuchungen der Wärmedämm- und Brandschutzschichten aus Schaumbaustoffen ist ebenso Fa. Bennert verantwortlich. Zuerst erfolgt Recherche und Vorsondierung möglicher Testanwendungen zur Demonstration und zu Anwendungsvarianten von Decken- und Fußbodenkonstruktionen im ersten Projektabschnitt. Unter Verwendung der durch die MFPA abgestimmten Vorzugsvarianten der geschäumten Standard- und Spezialmischungen wird Bennert eine Demonstrationsstrecke horizontaler Wärmedämm- und Brandschutzbauteile einrichten. Die Schaumbaustoffschichten werden händisch eingebaut und repräsentieren unterschiedliche Anwendungen bzw. Fußbodenaufbauten. Die Demonstrationsstrecke dient Untersuchungen zum Verarbeitungs- und Verlaufsverhalten, zur (inneren) Trocknung, Dehnungs- und Rissbildung sowie der Beurteilung der Oberfläche und sonstigen noch festzulegenden Kriterien. Es sollen neben der Bestimmung von Rohdichte und Festigkeiten u.a. thermische Kenngrößen, wie die Wärmeleitfähigkeit, sowie der Feuerwiderstand bestimmt werden. Hierzu werden Rückstellproben und Bohrkerne, die die MFPA entnimmt, verwendet. Die Bestimmung erfolgt durch die MFPA und das FIB. Sobald die künstliche Alterung im Alterungsdemonstrator der Firma AML umgesetzt werden kann, wird das so erhaltene gealterte Gipsbindemittel zur Herstellung der Schaumbaustoffe eingesetzt und durch die Fa. Bennert in die Demonstrationsstrecke eingebaut. Nachdem Bennert die Vorversuche zur maschinellen horizontalen Applikation erfolgreich beendet hat, werden mit ausgewählten Schaumbaustoffen Demonstrationsflächen maschinell angelegt, die dann unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt werden.

Angedacht ist eine Einflussnahme auf die Trocknung und das Erhärtungsverhalten. Hierdurch sollen reale Baustellenbedingungen nachempfunden werden. Auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen wird eine mobile Variante eines Demonstrationsobjektes gestaltet. Hieran sollen die bevorzugten Anwendungsvarianten der  $\text{CaSO}_4$ -Schaumbaustoffe als Ausgleichs- und Lastverteilungsschicht im Vergleich zu klassischen Versionen gedämmter Decken dargestellt werden.

#### **1.4 Meilensteine des Verbundprojektes**

Vier Meilensteine (M) dienen der Kontrolle, dass die gestellten Innovationsziele während des laufenden Projektes erreicht werden. Sie zeigen die zu erreichenden Zwischenziele transparent auf:

**M1:** 7 Monate nach Projektbeginn können stabile, den Zielvorgaben entsprechende Schaumbaustoffmischungen manuell hergestellt werden. Vorzugsrezepturen sind ermittelt. Die ersten praxisorientierte Tests an Bauteildemonstratoren haben begonnen.

Der Meilenstein wurde in Zusammenarbeit der Partner bereits erfolgreich erarbeitet.

**M2:** Nach 18 Monaten liegen im Labor erprobte Schaumbaustoffmischungen mit optimaler Additivkombination und unter Verwendung von (im Labor) gealtertem Stuckgips vor. Sie sind für die unterschiedlichen Zielanwendungen einsetzbar. Die ersten praxisorientierten Tests wurden abgeschlossen und bewertet. Der Demonstrator für die Umsetzung einer industriellen Alterung ist funktionstüchtig. Die Schaumbaustoffe können inzwischen maschinell mit einer kleintechnischen „Schaumgipsanlage“ hergestellt werden (Chargenbetrieb). Die Simulation von Feuchteprofilen mit Standardparametern ist erfolgt und konnte mit realen Messwerten von Bauteildemonstratoren verglichen werden.

**M3:** Nach 25 Monaten liegt eine bereits halbjährige Erfahrung zur Durchführung der Alterung im Demonstrator vor, und die Eignung zur hocheffizienten Verminderung des Wasseranspruches ist nachweisbar. Die maschinelle Applikation von geschäumten CaSO<sub>4</sub>-Baustoffen zur Herstellung von Wärmedämm- und Brandschutzbauteilen ist möglich. Die Funktionstüchtigkeit der Schaumbaustoffe für Dämmung und Brandschutz ist nach 1,5-jährigen Untersuchungen verifiziert und die Auswahl von hervorragenden Mischungen gegeben.

**M4:** Nach 33 Monaten sind die Versuche zur Alterung im Demonstrator abgeschlossen. Die kleintechnische Schaumbaustoffanlage arbeitet (im Versuchsstadium) nun im kontinuierlichen Betrieb. Dank erweiterter Datenbank ist eine exaktere, praxisnahe Simulation von Feuchteprofilen des Schaumbauoffs möglich. Nach 1,5 jährigen Untersuchungen ist die Eignung der Schaumbaustoffe für die Verfüllung sulfathaltigen Mauerwerks nachgewiesen und die Wahl von hervorragenden Mischungen möglich.

## 1.5 Verwertungsplan

Die Verwertungsplanung beruht auf der Fortführung der Kooperation der Verbundpartner nach Abschluss des FuE-Vorhabens. Die Rahmenbedingungen der Ergebnisverwertung werden im Kooperationsvertrag des Verbundes festgelegt. Die Ergebnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens sollen auf wissenschaftlichen Symposien, Tagungen, Workshops und in der Fachpresse vorgestellt und publiziert werden. Ziel ist, weitere Kontakte mit Institutionen, Firmen, Verbänden und Personen herzustellen, die Interesse an der Nutzung des neuen Baustoffes haben.

Große Marktchancen ergeben sich bei Etablierung des Calciumsulfat-Schaumbaustoffes als Massenprodukt. Allein 2010 wurden in Deutschland 1,9 Millionen m<sup>2</sup> Dämmstoffe auf Basis von EPS für Dämmplatten im Fußbodenbau bei Warmwasserfußbodenheizung verbaut (ca. 12-13 cm EPS als Platten zur Dämmung und Rohbodenausgleich). Mit Erreichen der Zielparameter kann die Vermarktung des Calciumsulfat-Schaumbaustoffsystems erfolgen.

Auch ohne die direkte Nutzung des neuen Baustoffs Schaumgips lassen sich die Ergebnisse des zu erarbeitenden Forschungsvorhabens direkt in anderer Form weiterverwenden:

Entwicklung neuer lagerbeständiger Gipsprodukte, da künstlich gealterte Halbfertigerzeugnisse keiner weiteren zeitabhängigen Veränderung der Eigenschaften unterliegen.

Zudem kann sich ein erheblicher wirtschaftlicher Vorteil in der Rezeptierung von Endanwendungen durch Einsparung von Abbindeverzögerern ergeben. Ein Hauptkostenpunkt bei Gipsprodukten sind neben der Energie die eingesetzten Additive zur Abbinde regulierung.

In Deutschland produzieren ca. 50 Gipswerke, welche mit den gewonnenen Erkenntnissen bei Erfolg direkt anlagentechnisch nachgerüstet werden könnten.

## 2 Kontaktdaten

- Andreas Hübner  
Leitung Produktmanagement  
CASEA GmbH  
Pontelstraße 3 // 99755 Ellrich // Deutschland  
T +49 36332 89 - 320 // M +49 171 30 41 300 // F +49 36332 89 - 202  
andreas.huebner@casea-gips.de // casea-gips.de

- Dr.-Ing. Saskia Nowak  
Bauhaus-Universität Weimar  
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde / Professur "Werkstoffe des Bauens"  
Coudraystr. 11 / 99423 Weimar  
Tel.: +49(0)3643/58 47 35 / Fax: +49(0)3643/58 47 59  
E-Mail: [saskia.nowak@uni-weimar.de](mailto:saskia.nowak@uni-weimar.de)  
<http://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/institute/fib/>
- Dipl.-Ing. Heike Dreuse, Forschungskordinatorin Abteilung Baustoffe  
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar)  
Postfach 231099404 Weimar  
Tel.: +49 (3643) 564-178 / [heike.dreuse@mfpa.de](mailto:heike.dreuse@mfpa.de)

# Untersuchung von Werkstoffsystemen für photokatalytisch hocheffiziente Baustoffe

PUREBAU

Dr. Horst Purwin, Dr. Thomas Koch  
*KRONOS INT. INC.*

Städtische Räume besitzen durch die Bebauung eine sehr große Oberfläche, die hauptsächlich durch Baustoffe wie Beton, Fassadenfarbe, Dachziegel, Glas usw. gebildet wird. Fast alle Baustoffe können potenziell durch die Ausrüstung mit Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) mit einer photokatalytischen Aktivität versehen werden. Diese verspricht enorme Vorteile:

- Abbau von Luftschadstoffen zur Verbesserung des städtischen Klimas
- Abbau von Anhaftungen und dadurch Verringerung der Oberflächenverschmutzung (weniger Wartungsaufwand, längere Lebensdauer)

Beide Effekte werden bereits heute im Labor mit großer Effizienz erreicht. Im Einsatz am Freilandobjekt jedoch können diese Laborergebnisse aktuell nicht erreicht werden. Die Verbundpartner haben zum Teil über das vorherige Verbundprojekt HelioClean aber auch unabhängig davon in den Bereichen Grundlagen und Normung, Messtechnik und Geräteentwicklung und Materialien und Rezepturen vielfältige Erfahrung im Bezug auf Photokatalyse und deren Applikationen, die im Projekt PureBau mit seiner vielseitigen Vernetzung ideal ergänzen (siehe Bild 1).

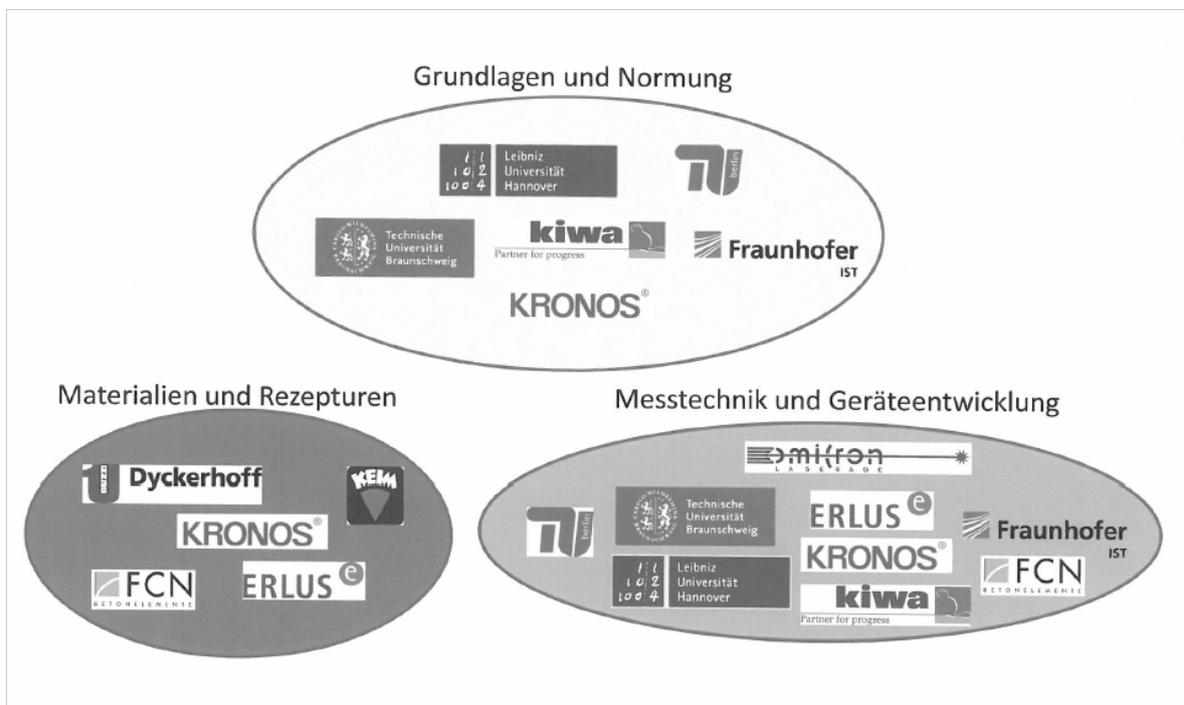


Bild 1: Grafische Zusammenfassung der Vorerfahrung der Projektpartner

## 1 Projektziele

Ziel des Verbundvorhabens ist es, die Erforschung neuer, verbesserter photokatalytisch aktiver Werkstoffe für die Bauwirtschaft nachhaltig von einem rein empirischen zu einem gezielten, besser planbaren Prozess zu überführen und mittels dieser neuen Möglichkeiten Demonstratoren mehrerer innovativer photokatalytischer Materialien für Bauanwendungen zu realisieren.

Am Markt werden immer mehr Produkte mit photokatalytisch aktiven Oberflächen angeboten. Diese Produkte bieten grundsätzlich die Möglichkeit zur Zersetzung von Schadstoffen in der Luft und im Wasser, zum Abbau von oberflächlichen Anhaftungen und zur Verhinderung von biologischem Bewuchs. Diese Produkte werden hauptsächlich in der Bauwirtschaft (Straße/Gehsteig, Fassade, Dachfläche) eingesetzt. Alle Photokatalyseanwendungen haben dabei eine Gemeinsamkeit: das photokatalytisch wirksame Material (der Photokatalysator, im Folgenden auch PK abgekürzt) ist immer in einem Materialgemisch eingebettet (im Rahmen der Projektbeschreibung im Weiteren als Werkstoff-, Baustoff- oder Materialsystem bezeichnet), das je nach Anwendung sehr unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweist. Der Einfluss des Werkstoffsystems auf die photokatalytische Aktivität wurde bisher kaum untersucht und wird aktuell nur ansatzweise verstanden. Die Erforschung und Entwicklung der bisherigen Materialien, Werkstoffe und Baustoffe geschah aus diesem Grund größtenteils nach dem Versuch-und-Irrtum-Prinzip. Diese empirische Herangehensweise war und ist sehr zeit- und kostenintensiv.

Zudem besteht oft eine signifikante Diskrepanz zwischen den im Labor erreichbaren photokatalytischen Effizienzen und denen, die in dem fertigen Produkt bei der praktischen Anwendung gemessen werden. Auch die Produktstabilität kann häufig nur in sehr geringem Maße im Vorfeld bestimmt oder aus Anwendungsbeobachtungen heraus definiert werden. So schwankt z. B. die photokatalytische Effizienz einiger produzierter Betonfertigwaren zwischen 4 - 16 %, trotz Homogenität der Zusammensetzung. Dies ist in den fertigungstechnischen Varianzen begründet.

Das Werkstoffsystem hat einen erheblichen Einfluss auf die Reaktionsumgebung: So kann z. B. je nach Zusammensetzung der Werkstoffsysteme der pH-Wert der Reaktionsumgebung zwischen 4 und 14 liegen. Zudem ist die photokatalytische Reaktion grundsätzlich unspezifisch, d. h. der Reaktionspartner des Photokatalysators kann jedes im Reaktionsraum vorliegende Molekül sein, welches mit den gebildeten Radikalen wechselwirken kann.

Bisher sind diese Wechselwirkungen der Werkstoffsysteme mit dem Photokatalysator und damit der Einfluss der Werkstoffsysteme auf die Photokatalyse nur in sehr geringem Ausmaß untersucht worden.

Das Verständnis für die Langzeitwirkung und die Wechselwirkungen der unterschiedlichsten Umwelteinflüsse auf die photokatalytische Oberfläche ist aktuell nicht ausreichend, um die gemessenen Unterschiede zu erklären und die Schaffung neuer Materialien gezielt voranzutreiben. Diese Problematik will das Verbundprojekt „PureBau“ nachhaltig lösen.

## 2 Vorgehensweise

Drei wesentliche Forschungsschritte sind hierzu erforderlich:

### 2.1 Verständnis der Wechselwirkungen

- Photokatalysator auf  $\text{TiO}_2$ -Basis – anorganische und organische Bestandteile der umgebenden Baustoffsysteme
- Photokatalysator auf  $\text{TiO}_2$ -Basis – pH-Wert der Werkstoffsysteme (Porenwasser)
- Photokatalysator auf  $\text{TiO}_2$ -Basis – Veränderungen der Baustoffoberfläche (Alterung, Ausblühungen usw.)
- Photokatalysator auf  $\text{TiO}_2$ -Basis – Lumineszenzfarbstoffe

## 2.2 Flexibles und Schnelles Messverfahren

- Quantitative Aussagen über den Abbau organischer Lumineszenzfarbstoffe durch eine photokatalytisch wirkende Oberfläche
- Messung unabhängig von den Oberflächeneigenschaften: Eigenfärbung, Form, Porosität und Struktur sowie Verunreinigungen der Oberfläche
- Kurze Messdauer (im Minutenbereich), um eine praktikable Durchführung auch außerhalb eines Labors zu ermöglichen
- Geringe Baugröße der Messapparatur (Handgerät), ebenfalls um eine praktikable Durchführung auch außerhalb eines Labors zu ermöglichen
- Einfache und effektive Methode zur Kalibrierung der Messeinheit

## 2.3 Evaluierung der Erkenntnisse

Die dritte wichtige Säule bei der Bearbeitung der Themen ist die Evaluierung der Erkenntnisse über die verschiedenen Wechselwirkungen durch Funktionsmuster verschiedener innovativer industrierelevanter Baustoffe und Materialien für die Bauwirtschaft mit signifikant höherem Wirkungsgrad bei der Schadstoffersetzung und Selbstreinigung mit folgenden Ansätzen und Materialsystemen:

- Photokatalysator und Photokatalysator-Granulate/Slurries/Pulver/Premixe mit charakterisierten Bestandteilen der Werkstoffsysteme zum Einsatz in den verschiedenen Werkstoffen
- Photokatalytisch modifizierte Zemente
- Betonoberflächen (Fertigteilbeton, Transportbeton)
- Dachziegel
- Pflastersteine
- Fassaden- und Innenfarben auf Silikatbasis

Die Tätigkeiten der Projektpartner werden in steter Abstimmung miteinander durchgeführt. Die Projektergebnisse werden in regelmäßigen Abständen unter allen Partnern diskutiert und der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Arbeitspaketen ist integraler Bestandteil der interdisziplinären Arbeitsplanung.

## 3 Arbeitsgruppen

Entsprechend der in Bild 1 gezeigten Vorerfahrungen bilden die Projektpartner drei Arbeitsgruppen um Themen des Projektes so effizient und umfassend wie möglich zu bearbeiten und die gesteckten Ziele zu erreichen. In Bild 2 sind die Arbeitsgruppen anhand der Firmenlogos entsprechend zusammen gefasst.



Bild 2: Grafische Darstellung der Zusammensetzung Arbeitsgruppen des Projekts

Zur Organisation wurden drei Arbeitsgruppen (AG) gebildet:

- AG Analytik bestehend aus TU Berlin - Institut für Bauingenieurwesen (BAU), Kiwa GmbH (Kiwa), Uni Hannover - Institut für Technische Chemie (TCI); Leitung: Herr Prof. Stephan, BAU
- AG Messsystem bestehend aus TU Braunschweig - Institut für Hochfrequenztechnik (IHF), Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST), Omicron-Laserage Laserprodukte GmbH (Omicron); Leitung: Herr Neumann, IST
- AG Werkstoffe bestehend aus Dyckerhoff GmbH (Dyckerhoff), ERLUS AG (ERLUS), F.C. Nüdling Betonelemente GmbH & Co. KG (FCN), Keimfarben GmbH (Keimfarben) und Kronos International, Inc. (KRONOS); Leitung: Herr Prof. Dr. Bahnemann, TCI

Diese Arbeitsgruppen dienen als kleinere organisatorische Gruppen, die effektiv und effizient Zwischenergebnisse diskutieren und schnelle Entscheidungen zum weiteren Vorgehen abstimmen können. Die Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Arbeitsaufteilung und Vernetzung zwischen den AGs.

In der dritten Arbeitsgruppe **Analytik** geht es im Wesentlichen um die Analyse und das Verständnis der auftretenden Wechselwirkungen und um die standardisierte Analyse der im Projekt hergestellten Proben. An dieser Gruppe sind unter der Leitung von Prof. Dr. Stephan (BAU) neben BAU, Kiwa und TCI indirekt viele Partner beteiligt, da fast alle Erfahrung im Umgang mit Photokatalysatoren aus dem HelioClean-Projekt mitbringen.

In der zweiten Arbeitsgruppe **Messsystem** unter der Leitung des IST, bestehend aus den Partnern Kiwa, Omicron, IST und IHF, die sich mit der Entwicklung eines portablen Messgerätes beschäftigt, das den photokatalytischen Abbau von Organika qualitativ und quantitativ anzeigen kann.

In der dritten Arbeitsgruppe **Werkstoffe**, die sich mit der Herstellung von photokatalytisch aktiven Zwischen- und Endprodukten beschäftigt, arbeiten KRONOS, ERLUS, Dyckerhoff, Keimfarben und FCN zusammen, um z. B. mit neuen Formulierungen die Anwendung und die Testung der Photokatalysatoren in der Applikation voran zu treiben und die theoretischen und praktischen Erkenntnisse der anderen beiden Gruppen zu überprüfen und in die Applikation einzuarbeiten.

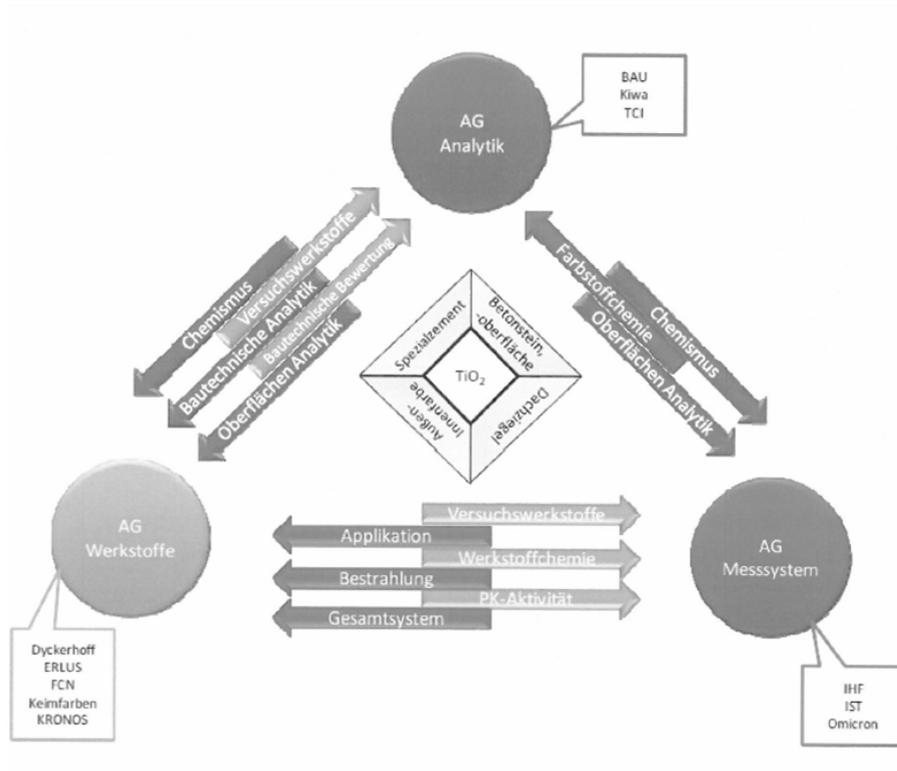


Bild 3: Grafische Darstellung der Vernetzung der Arbeitsruppen

Das Projektkonsortium wird mit der unter 3. definierten Vorgehensweise innerhalb dieser drei stark miteinander vernetzten Arbeitsgruppen (siehe Bild 3) im Rahmen des dreijährigen Projekts iterative Analysen durchführen. Dabei wird die gesamte Wertschöpfungskette der Werkstoffproduktion einbezogen, von den wissenschaftlichen Grundlagen, über Rohstoffe bis hin zur Herstellung von Werkstoffen und industrierelevanten Materialien aus diesen Werkstoffen. Aus diesem Ansatz entstehen nicht nur mehrere Demonstratoren hocheffektiver Photokatalyse-Werkstoffe, sondern es wird vor allem das Verständnis für die Grundlagen wesentlich erhöht und damit der gesamte Technologiebereich vorangetrieben. Das Projekt hat damit eine herausragende Bedeutung für den städtischen Lebensraum und für die deutsche Wirtschaft.

# SMART-DECK: Der innovative Brückenbelag

## SMART-DECK

Dr.-Ing. Till Büttner, Dipl.-Ing. Roger Bill

*Eurovia Beton, NL Bauwerksinstandsetzung*

### 1 Allgemeines

Unterläufige Abdichtungen sowie schadhafte Fugen- oder Übergangsprofile stellen, aufgrund des Eintritts von Chloriden in den Beton, eine Gefährdung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbrücken dar. Die Korrosion der Bewehrung ist von der Brückenseite oft erst erkennbar, wenn bereits ein erhebliches Schädigungsausmaß vorliegt. Die Folge sind umfangreiche Baumaßnahmen, die zu erheblichen Verkehrsbehinderungen und signifikanten volkswirtschaftlichen Verlusten führen.

SMART-DECK soll dem entgegen wirken und bietet dabei drei Funktionalitäten (s. Bild 1): Das System soll erstmals ein vollflächiges Echtzeit-Feuchtemonitoring, einen abschnittsweise steuerbaren präventiven kathodischen Korrosionsschutz (pKKS) sowie eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei Bestandsbrücken erlauben. Das Monitoring ermöglicht ein frühzeitiges Erkennen von Schäden in der Abdichtungsebene und, in Kombination mit dem pKKS, das Vermeiden von Verkehrsbehinderungen, da eine Erneuerung des Brückenbelages nicht zeitnah erforderlich ist, sondern über Jahre hinaus in verkehrsgünstige Perioden verschoben werden kann. Sowohl das Monitoring, der pKKS als auch die verstärkende Wirkung werden durch eine textile Carbonbewehrung in Kombination mit einem noch zu entwickelnden Spezialmörtel realisiert. Durch die Verstärkungsschicht soll sowohl die Biege- als auch die Querkrafttragfähigkeit der Fahrbahnplatte in Querrichtung vergrößert werden, ohne das Eigengewicht der Tragkonstruktion signifikant zu erhöhen.

Mit SMART-DECK werden auch wertvolle Informationen und Erfahrungen über alternative Anoden für KKS-Systeme und vollflächige Sensoren bereitgestellt und leistungsfähigere Systeme zur Überwachung und Instandsetzung erarbeitet. Auch bei Brückenneubauten wird die Anwendung von SMART-DECK aufgrund der langfristigen wirtschaftlichen Vorteile für den Nutzer erwartet. Die Technologie des intelligenten multifunktionalen Verstärkungs- und Schutzsystems aus textilbewehrtem Hochleistungsmörtel ist später auf andere Anwendungsfelder (Parkbauten, Tunnel, Meeresbauwerke) übertragbar.



SMART-DECK kann als Hightech-System sowohl für Neubauten als auch für Bestandsbauwerke und in Kombination mit den bisherigen bewährten oder zukünftigen Brückenbelägen sowie Regeldetails nach ZTV-ING verwendet werden.

## 2 Zusammensetzung des Forschungsverbundes

Als Kooperationspartner sind an dem Verbundvorhaben „SMART-DECK“ beteiligt:

- Eurovia Beton GmbH, Niederlassung Bauwerksinstandsetzug, Hofheim-Wallau (Projektkoordinator)
- Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach
- FTA mbH, Albstadt
- Massenberg GmbH, NL Bürstadt
- Sto SE & Co. KGaA, Stühlingen
- Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen
- Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen

Die am Projekt beteiligten Verbundpartner decken die gesamte Wertschöpfungskette und Nutzung von SMART-DECK mit wissenschaftlicher Begleitung ab.

Die Fa. Eurovia ist ein führendes deutsches Bauunternehmen im Bereich des Straßenbaus sowie der Instandsetzung von Brückenbauwerken. Im Rahmen des Projektes wird die Fa. Eurovia neben der Projektkoordination die Anforderungen, die sich aus der Ausführung eines Brückenbelags ergeben, definieren, um SMART-DECK bis hin zur Anwendungsreife zu entwickeln. Ferner wird die Fa. Eurovia für die Lösung der konstruktiven Details, die Ausführung von zwei Demonstratorflächen sowie der Verstärkung großformatiger Versuchskörper verantwortlich sein. Die beiden Demonstratorflächen stellen die beiden Meilensteine im Projekt dar und werden zum einen bei der BAST sowie auf einer Brücke mit Verkehrsbelastung ausgeführt. Das Sensornetzwerke in Verbindung mit dem pKKS wird von der Fa. Massenberg hinsichtlich seiner Applikation und des Betriebs konzeptioniert und ausgeführt. Ferner wird die Fa. Massenberg die Spezifikationen aller notwendigen elektrischen Komponenten definieren und an den Demonstratorflächen verifizieren. Die Fa. Massenberg repräsentiert eines der führenden Unternehmen im Bereich der Betoninstandsetzung und des Korrosionsschutzes, insbesondere auch des kathodischen Korrosionsschutzes. Aufgrund langjähriger Erfahrung in dem Bereich der Instandsetzung von Ingenieurbauwerken beschäftigt sie speziell ausgebildetes Personal für diese komplexen Tätigkeiten.

Die für SMART-DECK erforderlichen Werkstoffe – Mörtel und Bewehrung – werden von den Firmen Sto und FTA sowie Groz-Beckert in enger Zusammenarbeit mit den Ausführenden sowie den beteiligten Hochschulinstituten entwickelt. Die Fa. Sto ist im Bereich der Produkte für den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauwerken einer der Technologieführer und kann, aufgrund langjähriger Erfahrung anwendungsspezifische Produkte für die großtechnische Anwendung entwickeln. Die Fa. FTA, ein Unternehmen der Groz-Beckert Gruppe, ist ein Forschungsinstitut zum Aufbau neuer Geschäftsfelder im textilen Umfeld. Ein Schwerpunkt sind textile Bewehrungen aus Glas und Carbon für den Einsatz in Beton. Gemeinsam mit der solidian GmbH, ebenfalls ein Unternehmen der Groz-Beckert Gruppe und führender Anbieter von textilen Bewehrungen, können aufgrund der hohen Fertigungstiefe spezifische, anwendungsbezogene Materialanpassungen vorgenommen werden. Beide Firmen weisen im Bereich des Textilbetons langjährige Erfahrung in der Entwicklung innovativer Lösungskonzepte und Materialien in enger Kooperation mit der Wissenschaft auf.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) repräsentiert im Rahmen des Verbundforschungsprojektes den Nutzer von SMART-DECK sowie den Bauwerkseigentümer. Die BAST definiert die Anforderungen an die Funktionalitäten von SMART-DECK und beurteilt alle Teilschritte der Entwicklung aus Sicht des Nutzers. Ferner stellt die BAST die erforderlichen Demonstratorflächen zur

Verfügung und ist ein wesentlicher Multiplikator für das im Projekt entwickelte Wissen in die öffentliche Verwaltung.

Das Verbundforschungsvorhaben wird wissenschaftlich durch das Institut für Bauforschung (ibac) und das Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen begleitet. Beide Institute sind seit Gründung des SFB 532 u.a. mit der Forschung im Themenbereich des Textilbetons betraut. Das ibac wird neben der Mitarbeit an der Materialentwicklung das gesamte Monitoringsystem sowie das pKKS konzeptionieren und die erforderlichen Elektronikkomponenten und Steuerungsprogramme entwickeln. Dies erfolgt basierend auf der langjährigen Erfahrung in der Korrosionsforschung sowie des Textilbetons /Bru08/, /Büt12/, /Büt13/. Auch die Bestimmung und Bewertung des spezifischen elektrischen Widerstands von Beton und Mörtel wird derzeit intensiv am ibac erforscht, wobei neue Erkenntnisse in die Umsetzung des geplanten Verbundforschungsvorhabens einfließen werden /Rei12/

Das Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen übernimmt die Untersuchung der möglichen Biege- und Querkraftverstärkung einer Fahrbahnplatte. Bei diesen Untersuchungen kann auf die Erfahrung und Kenntnisse des IMB bezüglich der Entwicklung von textilbewehrten Bauteilen /Heg 06/, der Verstärkung von Brücken /Heg13/, /BMVBS11/ und der Querkrafttragfähigkeit von Brückenfahrbahnplatten /Heg12/ zurückgegriffen werden.

### **3 Untersuchungen innerhalb des Forschungsverbundes**

Die Erarbeitung von SMART-DECK erfolgt sowohl auf der Komponenten-, der Verbundwerkstoffebene als auch mit Hilfe zweier Demonstratoren. Im Rahmen der Arbeiten auf der Komponentenebene erfolgt eine enge Verzahnung der Arbeitsschritte zwischen den Verbundpartnern, da eine Abstimmung aller Komponenten - Mörtelsystem, textile Bewehrung und Sensornetzwerke – für die Erfüllung der Funktionalität von SMART-DECK erforderlich und keine singuläre Komponentenentwicklung zielführend ist.

Die im Zuge der o.g. Arbeitspakete erarbeiteten Komponenten werden ab dem 3. Projektquartal auf der Verbundwerkstoffebene untersucht. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen dienen zum einen zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems als auch der Modifikation der Einzelkomponenten zur Erzielung der Gesamtfunktionalität von SMART-DECK. Daher besteht auch hier eine sehr enge Vernetzung im gesamten Forschungsverbund, um die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen im Rahmen der weiteren Erarbeitung von SMART-DECK berücksichtigen zu können.

Die Erstellung der zwei Demonstratoren erfolgt mit Hilfe des gesamten Projektverbundes, da nur so alle erforderlichen Kompetenzen, die für die Erstellung eines funktionstüchtigen Demonstrators notwendig sind, gebündelt werden können. Aufgrund der Beteiligung aller Projektpartner bei der Erstellung der Demonstratoren ist ein Zugang aller Beteiligten zu den Erkenntnissen, die aus der Erstellung der Demonstratoren gewonnen werden, gesichert und jeder Partner kann, insbesondere nach der Erstellung des ersten Demonstrators („klein“) die Erkenntnisse für die daran anschließenden Arbeiten auf der Komponenten- sowie Verbundwerkstoffebene nutzen.

Die Erstellung von zwei Demonstratoren ermöglicht bereits während des Projektes eine sehr anwendungsnahe Erarbeitung des Gesamtsystems SMART-DECK. Es ist allerdings davon auszugehen, dass für eine breite Anwendung von SMART-DECK noch Optimierungen sowie Anpassungen einzelner Komponenten erforderlich sind.

Aufgrund der großen wirtschaftlichen und wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten des gesamten Konzeptes werden die erforderlichen Arbeiten nach Abschluss des Projektes durch die beteiligten Industriepartner forciert und finanziert, um am Ende der Arbeiten ein vermarktungsreifes Produkt zu erhalten. Die Ergebnisverwertung aus dem Forschungsprojekt heraus erfolgt zum einen durch die geplanten Anwendungen und damit durch die kontinuierliche Anwendung von SMART-DECK sowie zum anderen durch Fachveröffentlichungen sowie die Arbeit der Projektpartner in Gremien, die sich mit der Normung von Instandsetzung und –haltung befassen. Langfristig kann daher davon ausgegangen werden, dass SMART-DECK ein standardisiertes Instandsetzungsverfahren wird, welches in den für Brücken relevanten Normen und Richtlinien geregelt wird.

## 4 Literatur

- /BMVBS11/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.): Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bonn, 2011.
- /Bru08/ Bruns, M.; Raupach, M.: CP of the Rear Reinforcement in RC-Structures - Numerical Modeling of the Current Distribution. London [u.a.] : CRP Press Taylor & Francis Group, 2009. - In: Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Ret-rofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, November 24-26, 2008
- /Büt12/ Büttner, T.; Raupach, M.: Des Bauwerks neue Kleider. Funktionsprinzipien und Einsatzmöglichkeiten von Textilbetonschichten zum Schutz von Bauwerken: In: Bauen im Bestand 35 (2012), Nr. 6, S. 70-75, ISSN 2190-9504
- /Büt13/ Büttner, T.; Raupach, M.: Dauerhafter Schutz von Bauwerksoberflächen mit Textilbetonschichten - Funktionsprinzipien und Einsatzmöglichkeiten: Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2013. - In: 3. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken: Conservations of Buildings. Esslingen, 22. und 23. Januar 2013, (Raupach, M. (Ed.)), S. 717-726, ISBN 98-3-943563-03-0
- /Heg06/ Hegger, J.; Brameshuber, W.; Will, N.: Textile Reinforced Concrete, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete (ICTRC), Aachen, 2006
- /Heg12/ Hegger, J.; Reißer, K.: Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen – speziell: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten. Schlussbericht, Institut für Massivbau der RWTH Aachen, IMB-Berichtsnr.: F-2009-025, 2012 (Veröffentlichung der BAST in Vorbereitung).
- /Heg13/ Hegger, J.; Karakas, A.: Verstärken von Brücken und Ingenieurbauwerken: Analyse möglicher Verstärkungsverfahren für Betonbrücken im Expertensystem – Modul II. Abschlussbericht FE 15.0478/2009/DRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen, 2013
- /Rei12/ Reichling, K.; Klitzsch, N.; Raupach, M.: Tomographische Widerstandsmessungen an Stahlbetonbauteilen: Tomographic Imaging of Electric Resistivities on Reinforced Concrete Structures. In: Restoration of Buildings and Monuments 18 (2012), Nr. 5, S. 275-286 ISSN 1864-7251

Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Das BMBF hat die VDI Technologiezentrum GmbH (VDI TZ) als Projektträger mit der Beratung und der Umsetzung der Förderrichtlinien beauftragt.

# Nachhaltiger HighTech-Asphalt: Schadstoff- und lärmindernd mit neuer Verarbeitung und Überwachung

NAHITAS

Prof. Dr. Dietmar Stephan, Sandra Weigel

*Technische Universität Berlin*

*Institut für Bauingenieurwesen / Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie*

Das Ziel dieses im Juli gestarteten Verbundprojektes mit dem Schwerpunkt Materialforschung liegt in der Konzeption von nachhaltigen Verkehrswegen in der Asphaltbauweise. Durch die Zusammenarbeit von Großunternehmen, KMU und Hochschulen sollen die Asphaltstraßen durch die Schaffung photokatalytischer Eigenschaften zur Reduzierung der Schadstoffbelastung, durch die Minderung des verkehrsbedingten Lärmpegels, durch eine dauerhafte Konzeption sowie durch angepasste Verarbeitungs- und Überwachungstechniken verbessert werden. Auf diese Weise wird die Aufrechterhaltung der Verkehrsinfrastruktur unterstützt, die Lebensqualität in Bereichen mit stark befahrenen Verkehrswegen nachhaltig verbessert und die Güte bei der Bauausführung optimiert.

Zum Erreichen der Ziele wurden die folgenden Ansätze erarbeitet:

- Die Reduzierung der Schadstoffbelastung in der Luft erfolgt durch Konzeption eines photokatalytischen Granulats, das durch zwei getrennte Ansätze hergestellt wird. Dabei wird zum einen Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) chemisch an natürliche Gesteinskörnung angebunden, während zum anderen ein synthetisches Einbaumaterial aus gebrochenem, photokatalytischem UHPC gewonnen wird. Zusätzlich zu den Eignungsprüfungen des Einbaumaterials erfolgt eine Simulation der Schadstoffreduzierung.
- Neben der Untersuchung eines potentiellen Einflusses des  $\text{TiO}_2$  auf die Bitumenalterung soll weiterhin die Wirkung marktüblicher Verjüngungsmittel analysiert werden, um die Dauerhaftigkeit und die Recyclingfähigkeit des Materials zu optimieren.
- Die Lärmreduzierung erfolgt durch die Konzeption einer lärmindernden Textur (Plateau mit Schluchten), die durch die Modellierung der Reifenabrollprozesse unterstützt wird. Zudem wird die Dauerhaftigkeit der lärmindernden Textur durch die Erweiterung des Pavement-Management-Systems (PMS) bewertet.
- Durch Anwendung eines neuen Einbauverfahrens zur Einarbeitung des photokatalytischen Einbaumaterials in die zeitgleich eingebaute Fahrbahnoberfläche sollen die angestrebten neuen Eigenschaften der Asphaltdeckschicht erreicht werden.
- Ein mobiles Qualitätsmesssystem, angeordnet an einer Walze, soll schon während des Einbauprozesses und nicht erst nach dessen Abschluss die vorgegebene Fahrbahngriffigkeit, Lärmabsorption, Fahrbahnelligkeit und -oberflächenstruktur gezielt ermitteln.
- Die konzipierten Materialien und Techniken sollen in Demonstratoren erprobt werden.

Da das Projekt erst im Juli 2015 begonnen hat, liegen derzeit noch keine Forschungsergebnisse zur Präsentation vor.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgt unter dem Konsortialführer TPA GmbH Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation durch die Verbundpartner F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG, Asphalta Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH und Co. KG, Müller-BBM GmbH, Bomag GmbH, MOMA Mobile Automation AG, FH Köln, Universität Kassel vertreten durch das Fachgebiet Chemie mesoskopischer Systeme und das Sachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen sowie die TU Berlin vertreten durch das Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie und das Fachgebiet Straßenwesen.

# **Untersuchung multifunktionaler Straßenbaumaterialien und Verbundwerkstoffe zur Nutzung solarer Energie und Verbesserung der Dauerhaftigkeit**

SEDA

Sebastian Pinnau

*TU Dresden, Professur für Technische Thermodynamik*

Markus Clauß

*TU Dresden, Professur für Straßenbau*

## **1 Zusammenfassung**

Ziel des Forschungsprojektes ist die Untersuchung des Potentials von Straßenbefestigungen als Energiequelle. Hierbei liegen der Fokus und die Innovation des Projektes sowohl auf dem Verstromungspotential der in der Straße durch Sonneneinstrahlung gespeicherten thermischen Energie als auch in einer erhöhten Dauerhaftigkeit der Straßenkonstruktion durch Abfuhr der Wärme. Für eine optimale Nutzung des solaren Strahlungsangebotes werden neue Materialien und Verbundwerkstoffe benötigt, die vorteilhafte Wärmetransporteigenschaften (hohe Wärmeleitfähigkeit, großer Absorptionsgrad) mit den bestehenden Anforderungen an das mechanische Verhalten verbinden. Hierfür sollen neue multifunktionale Verbundwerkstoffe – wie beispielsweise Asphalt mit eingebetteten Wärmeleitstrukturen oder poröse, durchströmbare Asphaltsschichten – hinsichtlich ihrer prinzipiellen Anwendbarkeit sowie technologischer Einbau- und Verarbeitungsmöglichkeiten untersucht werden. Zielstellung ist die Bereitstellung neuartiger Kollektorvarianten als Ergänzung zu bisher verwendeten Kollektorsystemen mit einfachen Rohrleitungen. Dabei sollen insbesondere Aspekte urbaner Anforderungen berücksichtigt werden, um ein ganzheitliches Konzept zur Energienutzung zur erarbeiten und zu realisieren.

Weiterhin sollen im Rahmen dieses Projektes bestehende Verfahren bzw. Systeme zur Umwandlung von thermischer in elektrische Energie entsprechend den Anforderungen, die sich aus der Kopplung mit Straßen-Kollektor-Systemen ergeben, adaptiert werden. Vielversprechend für die Verstromung der Wärme erscheint die Nutzung von ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle), wobei sich die Temperaturniveaus für diesen Anwendungsfall deutlich unterhalb üblicher Werte von bisherigen Nutzungen bewegen. Es müssen daher geeignete organische Stoffe oder Stoffgemische als Arbeitsfluide identifiziert und charakterisiert werden.

Die aus dem Energieentzug resultierende Kühlung kann zusätzlich eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Straßenbefestigung bewirken. Die entzogene Energie soll dabei primär in Form von elektrischer Energie zur Verfügung gestellt werden. Die nicht transformierbaren Wärmemengen sollen vor allem im urbanen Bereich den anliegenden Verbrauchern zur Verfügung gestellt werden. Entsprechende Ansätze sollen im Rahmen dieses Projektes erarbeitet werden. Dadurch lassen sich die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen von Siedlungsräumen verbessern.

## **2 Ziele**

### **2.1 Problemstellung und Motivation**

Straßenbefestigungen unterliegen im Laufe ihrer Nutzungszeit intensiven Temperatureinwirkungen infolge der vorherrschenden Wetterbedingungen. Die einzelnen Befestigungsschichten müssen dabei je nach ihrer Lage innerhalb des Oberbaus Temperaturen im Bereich von ca. -20 °C bis über 50 °C ertragen. Besonders hohe Temperaturen im Sommer treten dabei insbesondere bei Asphaltflächen auf, da diese mit ihren großen Absorptionsgraden die Aufnahme der solaren Strahlung begünstigen.

Gleichzeitig sind eben diese hohen Temperaturen bei Asphaltbefestigungen als strukturell besonders kritisch zu betrachten. So beeinflusst die in der Straßenkonstruktion befindliche Wärme die Stabilität und Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigungen maßgebend. Besonders hohe Temperaturen in den oberen Schichten einer Asphaltbefestigung können zu einer signifikanten Verringerung der Steifigkeit und somit der Verformungsbeständigkeit dieser Asphaltsschichten führen. Damit erhöht sich die Spurrinnenempfindlichkeit der Konstruktion merklich. Je höher die Temperaturen an der Unterseite der Asphalttragschicht werden, desto geringer wird die Ermüdungsbeständigkeit dieser Schicht. Dies führt, bezogen auf den Lebenszyklus der Konstruktion, auch zu einer Reduzierung der Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigung. Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem im Kontext künftiger klimatischer Veränderungen diese Tendenzen verstärkt werden. So bewirkt beispielsweise eine durchschnittliche Erhöhung der Temperaturen im unteren Bereich der Asphalttragschichten um ca. 1,0 K eine Verkürzung der rechnerischen Nutzungsdauer der gesamten Straßenkonstruktion um ca. 20 % /1/ /2/ /3/. Mit Blick auf solche zukünftigen thermischen Potentiale wird aus Sicht der Autoren die Nutzung der in der Konstruktion enthaltenen Wärmeenergie an Bedeutung gewinnen – vor allem auch im Kontext der Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch Verringerung der thermischen Belastungen infolge des Wärmetzugs. Darin ist die Motivation dieses FuE-Projektes begründet.

Bisherige Forschungsprojekte /4/ /5/ zur Freiflächentemperierung beschäftigten sich im Wesentlichen mit der Beheizung der Straßenkonstruktion freier Strecken als auch des Straßenbelags auf Brücken in der winterlichen Jahreszeit. Darüber hinaus wird in /4/ die Möglichkeit analysiert, die thermische Energie der Straßenkonstruktion zur Unterstützung der Wärmeversorgung (Warmwasser und Heizung) von Gebäuden heranzuziehen. In den vorstehend genannten FuE-Projekten wurde als Kollektorlösung auf Rohrleitungssysteme beziehungsweise Rohrregister zurückgegriffen. Solche Rohrleitungssysteme haben sich in der Gebäudeenergie-technik für die Verwendung als Fußbodenheizungen, als Flächenkollektoren für Erdwärmeheizungen oder auch für die Bauteilaktivierung etabliert. Auch in anderen Untersuchungen und praktischen Anwendungsbeispielen wurde auf diese Systemlösung zurückgegriffen. Alternative Kollektorsysteme wurden bisher nicht weiter untersucht.

Gerade für die erweiterte Straßennutzung zur Energiegewinnung wird aber ein großes Potential in der Erforschung neuer multifunktionaler Materialien und Verbundwerkstoffe gesehen, um eine optimale Ausnutzung des solaren Wärmeangebotes mit den bestehenden Anforderungen hinsichtlich mechanischer Materialeigenschaften des Asphaltes in der Konstruktion zu verknüpfen. Ein weiteres Problem zeigt sich beim Einbau der Systeme. Im Rahmen des Forschungsprojektes /5/ wurde auf der Kanalbrücke Berkenthin ein System mit den vorstehend beschriebenen Rohrregistern realisiert. Allerdings erfolgte der Einbau der Rohre und der Asphaltsschicht, in die das System eingebettet ist, per Hand. Der maschinelle Einbau vor allem der Asphaltsschichten ist für eine praxistaugliche Umsetzung solcher Systemlösungen jedoch zwingend notwendig. Dabei ergeben sich verschiedene einbautechnologische Schwierigkeiten (z. B. Befahrbarkeit des Kollektorsystems durch den Fertiger; Überbelastung der Rohrleitungen infolge Asphaltverdichtung). Ebenso stellt sich die Frage nach der Beschädigung der Rohrleitungen infolge Erneuerung der Verschleißschichten des Oberbaus. Hier ist eine gesamttechnologische Betrachtung erforderlich.

## **2.2 Gesamt- und Arbeitsziele**

Aufbauend auf bisherigen Forschungsarbeiten sollen weitere Fragestellungen hinsichtlich einer effektiven Nutzung des thermischen Potentials der Straße sowie des damit verbundenen zusätzlichen Effektes der Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigung bearbeitet werden. Übergeordnetes Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, dass solarthermische Energiepotential durch gezielte Energieumwandlung (Verstromung) sowie unter Einbeziehung alternativer Kollektorsysteme effektiver und nachhaltiger zu nutzen. Der Fokus liegt dabei vor allem auf einer späteren Anwendung im urbanen Gebiet, da sich hier vielfältige Möglichkeiten zur Nutzung der gewonnenen Energie ergeben. Die zu analysierenden Systemlösungen müssen dafür im Kontext einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse der Straßenkonstruktion, von der Herstellung über den Betrieb bis hin zur Instandhaltung bzw. Erneuerung einschließlich der Berücksichtigung der Randbedingungen, die sich aus den urbanen Gebieten ergeben, betrachtet und beurteilt werden.

Ausgewählte Systemlösungen sollen auf dem Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST (duraBAST) großmaßstäblich umgesetzt und wissenschaftlich untersucht und begleitet werden. Die Vorzugsvariante soll abschließend auf einer Erprobungsstrecke praktisch realisiert werden. Aus dieser übergeordneten Zielstellung lassen sich für dieses FuE-Projekt wesentliche Untersuchungsschwerpunkte ableiten.

## 2.2.1 Verstromungspotential der thermischen Energie aus Asphaltflächen

Im Rahmen dieses FuE-Projektes soll erstmalig analysiert werden, inwieweit die in der Straße gespeicherte Wärme in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dabei sollen verschiedene Transformationsvarianten (z. B. ORC-Prozesse, Seebeck-Effekt) in die Untersuchungen eingebunden werden. Seitens der Professur für Technische Thermodynamik der TU Dresden wurden erste Voruntersuchungen durchgeführt, die für die auftretenden Temperaturbedingungen Potentiale zur Verstromung zeigen. Ein Schwerpunkt für ORC-Anwendungen ist die Untersuchung geeigneter Arbeitsfluide. Überschüssige Wärme soll in einem integralen Nutzungskonzept entsprechend Bild 1 möglichst vollständig verwertet werden. Die Effektivität der möglichen Transformationslösungen hängt dabei entscheidend von der Temperatur ab, mit der die Wärme aus der Konstruktion entnommen werden kann. Dabei spielt die Art und Weise, wie diese thermische Energie aus der Konstruktion abgeführt wird, eine wesentliche Rolle.

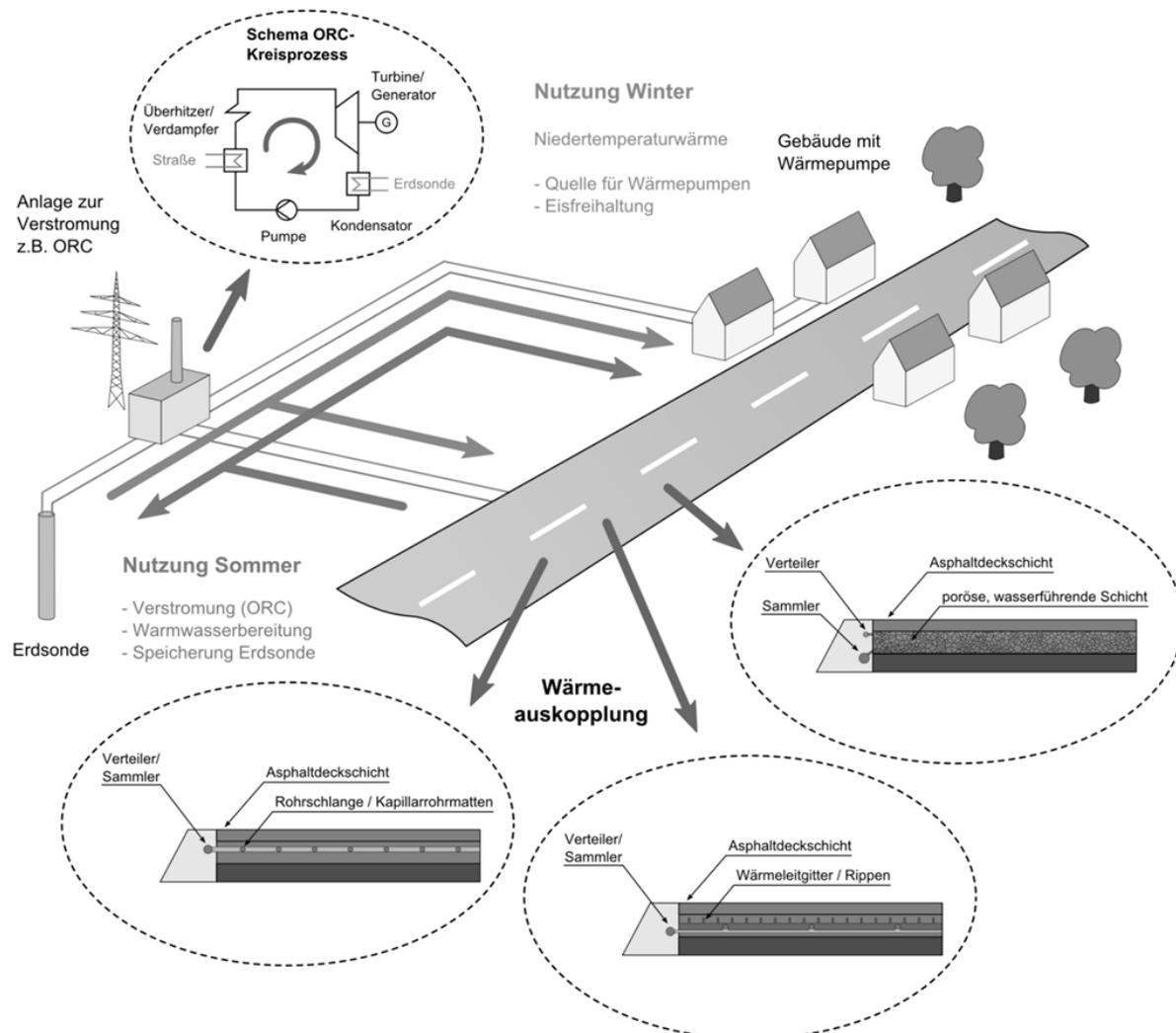


Bild 1: Schematische Darstellung verschiedener Nutzungsszenarien und Kollektortypen

## **2.2.2 Alternative Kollektorsysteme / Charakterisierung Materialeigenschaften**

Ein weiteres Arbeitsziel dieses FuE-Projektes beinhaltet die Analyse unterschiedlicher Kollektorsysteme, mit denen die Wärmeenergie aus der Straßenkonstruktion entzogen werden kann. Neben den in bisherigen Arbeiten verwendeten Varianten mit einfachen Rohrregistern sollen vor allem alternative Systeme untersucht werden (siehe Bild 1). Durch den Einsatz neuer Materialien und Kombination von Werkstoffen soll hier eine bessere Adaption des Systems für die zusätzliche Aufgabe der Energiegewinnung erfolgen.

Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von wasserdurchlässigen Asphaltsschichten dar. Dazu wird Wasser oder ein anderer geeigneter Wärmeträger in offenporige Schichten eingeleitet, durch Sonneneinstrahlung erwärmt und über ein geeignetes Drainagesystem abgeleitet. Die Durchströmbarkeit des Asphalt-Verbundmaterials ermöglicht eine Kühlung im Direktkontakt mit der Wärmeträgerflüssigkeit, so dass thermische Übergangswiderstände gegenüber eingebetteten Rohrsystemen reduziert werden. Vorteilhaft ist zudem die große Wärmeübertragerfläche der offenporigen Beläge. Problemstellungen ergeben sich aus der Materialverträglichkeit zwischen Asphaltmischgut und Wärmeträgerfluid, welches für den winterlichen Einsatz Frostschutzmittel enthalten muss (z. B. Wasser/Glykol-Gemisch). Hier ist zu prüfen, inwiefern es zu Beeinflussungen des Bindemittel und der Gesteinskörnungen im Asphalt kommt. Unklar ist derzeit jedoch noch, in wie weit ein solches System einbautechnologisch umsetzbar ist. Statt poröser Asphaltzwischen-schichten ist auch die Verwendung von Drainagematten (Geotextilien) denkbar. Während hierbei der Aspekt des Einbaus dieser Drainagematten als weniger kritisch gesehen wird, sind bei dieser Variante die Konsequenzen des System auf den Schichtenverbund der Konstruktion und somit auf deren Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit zu untersuchen.

Eine weitere Variante welche im Rahmen dieses FuE-Projektes analysiert werden soll, ist der Wärmeentzug über Wärmeleitgitter z. B. aus Kupfer oder Aluminium. Durch die Einbettung der metallischen Wärmeleitstrukturen in den Asphalt entsteht – analog zum Stahlbeton – ein Verbundwerkstoff mit verbesserten thermischen und mechanischen Eigenschaften. Die Integration dieser Strukturen kann z. B. in Form von Rippen oder Lamellen an Rohren erfolgen und ermöglicht somit größere Verlegeabstände im Vergleich zu den bisher eingesetzten Rohrleitungssystemen im Asphalt. Darüber hinaus kann dieses System weitere einbautechnologische Vorteile besitzen. So sind diese Wärmeleitgitter weniger anfällig bezüglich der mechanischen und thermischen Belastungen während des Einbauprozesses. Aus Sicht der Antragsteller ist es durch die Verwendung solcher Wärmeleitgitterlösungen gegenüber den Rohrleitungssystemen eher möglich, eine homogene Verteilung und Verdichtung des Asphaltmischgutes beim Einbau, als Voraussetzung für ein dauerhaftes Kollektorsystem, zu erreichen.

Von Bedeutung für eine hohe Ausnutzung des solaren Strahlungsangebotes sind auch die thermischen Eigenschaften des Asphaltmischgutes. Eine Verbesserung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Verbundwerkstoffes Asphalt (z. B. durch Austausch oder gezielte Auswahl des Gesteinsmaterials) führt zu einer homogeneren Temperaturverteilung im Straßenaufbau und verbessert den Wärmetransport zu den fluidführenden Kollektorbauteilen. Der Absorptionsgrad (bzw. Emissionsgrad) der Asphaltoberfläche bestimmt, welcher Anteil der solaren Einstrahlung aufgenommen wird. Im Rahmen des Projektes sollen Einflussmöglichkeiten und Potentiale von Veränderungen dieser Kennwerte bei Asphaltmaterialien untersucht werden.

## **2.2.3 Analyse multifunktionaler Kollektorsysteme**

Die Wärmeleitgitterlösung bietet darüber hinaus möglicherweise einen weiteren wesentlichen Vorteil. Der entstehende Verbundwerkstoff aus Asphalt und metallischen Wärmeleitstrukturen soll aufgrund der Bewehrungswirkung eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchungen ermöglichen. Hierbei ist die Verbundwirkung zwischen dem Korngerüst, Bindemittel und bewehrungsartigem Kollektor für die mechanischen Eigenschaften der Konstruktion maßgeblich. Die von der Materialtemperatur abhängige Viskosität des Bindemittels sowie das relaxierende Verhalten lassen bei hohen Temperaturen eine geringere Steifigkeit der Gesamtkonstruktion erwarten. Fungiert jedoch die Bewehrung gleichzeitig als Wärmekollektor (Wärmeleitgitter), die dadurch zu einer

Abkühlung der kollektornahen Schichten führt, kann das die Bewehrungswirkung des Kollektors verbessern. Alternativ zur Verwendung von berippten Rohren ist es denkbar, die Wärmeleitstrukturen durch geeignete Mischgutkonzeption oder das Einbringen von wärmeleitverbessernden Zusatzstoffen zu optimieren. Das dritte Arbeitsziel des FuE-Projektes umfasst die Untersuchung eines solchen multifunktionalen Kollektorsystems. Dabei sollen einerseits die Grundlagen für ein solches System erarbeitet und andererseits die Wirksamkeit und praktische Realisierbarkeit analysiert werden.

#### **2.2.4 Integrationspotential für urbane Systeme**

Die Nutzung der Energie ist ein wesentlicher Aspekt für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit des Vorhabens. Dazu ist zu analysieren, wo und wie die Energie im urbanen Raum genutzt und wie die Integration in die bestehenden stadttechnischen Systeme der Energieversorgung organisiert werden kann. Außerdem sollen mögliche Einschränkungen der Nutzung des Bauraums Straße geprüft und minimiert werden. Ein weiterer Aspekt sind bau- und planungsrechtliche Gesichtspunkte. Arbeitsziel ist es, Rahmenbedingungen für die sinnvolle und konfliktfreie Integration des Systems zu erarbeiten und bereits bei der Untersuchung der Kollektorsysteme zu berücksichtigen.

#### **2.2.5 Großmaßstäbliche Umsetzung Erprobungsstrecke**

Die durch die theoretischen und labortechnischen Untersuchungen aus den vorherigen Arbeitszielen gewonnenen Grundlagen und Erkenntnisse (Systemlösungen) sollen hinsichtlich ihrer praktischen Realisierbarkeit untersucht werden. Dies soll durch ein zweistufiges System erfolgen. In der ersten Stufe werden ausgewählte Systemlösungen hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit auf dem duraBAST analysiert. Aufbauend auf den dort gesammelten wissenschaftlichen Erkenntnissen soll eine „Vorzugsvariante“ praktisch erprobt werden (Demonstrator).

### **3 Relevanz des Themas**

Die gesellschaftliche Relevanz des Themas liegt auf der Hand. Im Zuge der angestrebten Energiewende werden neue Quellen für regenerative Energien gesucht, die nach Möglichkeit aus bereits bestehenden Strukturen erschlossen werden können. Dazu kann möglicherweise die Gewinnung von Energie aus Verkehrsflächen einen wichtigen Beitrag leisten, da diese als Infrastruktursystem in Siedlungsräumen ohnehin vorhanden sind und damit eine Energienutzung ohne zusätzliche ökologische Schädigung (z. B. Versiegelung, Zerschneidung) und ohne größeren Transport zwischen Gewinnung und Nutzung denkbar ist. Gleichzeitig bietet der Straßenkörper in der Regel den unterirdischen Bauraum für die stadttechnischen Systeme der Energieversorgung, so dass eine Kopplung bautechnisch voraussichtlich gut realisierbar ist. Durch die Verlängerung der Nutzungsdauer von Straßenflächen kann die Effizienz der Straßenbauinvestitionen erhöht werden. Ebenfalls nicht zu vernachlässigen sind die ökologischen und gesellschaftlichen Nutzen durch vermiedene Instandsetzungen und Ersatzinvestitionen, welche allerdings schwer zu quantifizieren sind. Außerdem könnte die öffentliche Hand als allgemeiner Baulastträger der Straßenflächen möglicherweise Einnahmen durch die energetische Nutzung generieren.

Der industrielle Nutzen liegt in der Erforschung einer innovativen Technologie mit weltweitem Einsatzpotential. Dies bietet Möglichkeiten zur Erschließung neuer Geschäftsfelder und zur Stärkung des Wirtschaftsstandortes Deutschland im internationalen Wettbewerb. Im anglo-amerikanischen Raum sind derartige Konzepte bereits angedacht, aber noch nicht in letzter Konsequenz umgesetzt worden /6/. Es besteht also Handlungsbedarf, um bei der Erforschung von Technologien dieser Art nicht ins Hintertreffen zu geraten.

#### **4 Literatur**

- /1/ Kayser, S.: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse für Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau, 2007
- /2/ Kayser, S.: Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Dauerhaftigkeit von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Band 58/2009, S. 89-93, 2009
- /3/ Kayser, S.: Climate Change – Ramifications for Structural Road Design. Safe Global Environment, 11th International Conference on Asphalt Pavements, Conference proceedings, Nagoya (Japan), 2010
- /4/ Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie, Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: FE 09.174/2011/HRB, 2013
- /5/ Feldmann, M. ; Döring, B. ; Hellberg, J.: Vermeidung von Glatteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie : Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 15.401/2004/ARB
- /6/ Mallick, R. B. ; Chen, B.-L. ; Bhowmick, S.: Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect. International Journal of Sustainable Engineering 2 (2009) S. 214-228

# NANOPORÖSER DRUCKFESTER PORENBETONSTEIN HERGESTELLT UNTER EINSATZ VON CALCIUMHYDROSILIKAT-BINDER

NAPOS

Uwe Schweike  
*Celitement GmbH*

## 1 Das Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es, einen massiven mineralischen Baustein auf Basis der Porenbetontechnologie zu entwickeln, der neben der Funktion als tragende Struktur auch eine vollwertige Wärmedämmfunktion nach Passivhausstandard besitzt. Er soll chemisch homogen, leicht zu bearbeiten und vollständig rezyklierbar sein.

Wissenschaftlich-technisches Ziel ist zum einen ein nanoporöser Leichtzuschlag, der die 1-2mm großen Treibporen des Porenbetons ersetzt. Um eine vollständige Integration in das Gefüge des Porenbetons zu ermöglichen, soll der Leichtzuschlag ausschließlich aus nahezu amorphen Calciumsilikathydraten (C-S-H) bestehen und die gleiche Zusammensetzung wie „grüner“ Porenbeton besitzen. Er wird der Porenbetonsuspension vor der Dampfhärtung anstelle von Aluminium zugegeben. Im Labormaßstab wurden solche Leichtzuschläge durch Hydratation eines neuen hydraulischen Bindemitteltyps, sogenannten hydraulischen Calciumhydrosilikaten („Celitement“, h-CHS) bereits erzeugt. Das nanoporöse Gefüge entsteht selbstorganisiert bei der Hydratation mit hohem Wasser- zu Bindemittel-Verhältnis.

Um die großtechnische Herstellung von nanoporösen Porenbetonsteinen zu ermöglichen, wird ein geeigneter Calciumhydrosilikat-Binder zunächst im Labormaßstab und anschließend in einer Pilotanlage im 100 kg Maßstab optimiert und das Hydratationsprodukt auf seine Eignung als Leichtzuschlag für Porenbeton geprüft. Anschließend wird in zwei bis drei großtechnischen Versuchen nanoporöser Porenbeton produziert und auf Marktfähigkeit getestet. Mit Beginn der großtechnischen Versuche erfolgt eine life-cycle-analysis (LCA) über verschiedene Anwendungsfälle.

Das Konsortium besteht aus der Celitement GmbH als Konsortialführer, der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH und dem Karlsruher Institut für Technologie. Neben den technischen Zielen wird insbesondere eine wirtschaftliche und in Herstellung, Nutzung und Recycling ressourcen- und energieeffiziente sowie umweltschonende Technologie angestrebt.

## 2 Ziele

### 2.1 Motivation und Gesamtziel des Verbundes

Die Entwicklung von über den gesamten Lebenszyklus integriert effizienten Baumaterialien ist für zukunftssichere Gebäude und Infrastruktur essentiell. Dazu muss der Einsatz von Rohstoffen und Energie bei der Herstellung, die Verarbeitung, die Dauerhaftigkeit, der Wärmebedarf und die Flexibilität in der Nutzung und schließlich die Wiederverwertung betrachtet werden. Gleichzeitig müssen die Baumaterialien den technischen Anforderungen genügen und ökonomisch rentabel, d. h. wirtschaftlich effizient sein.

Unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz sind viele der am Markt erhältlichen Verbundsysteme kritisch zu betrachten, da zum einem teure, z. T. erdölbasierte Rohstoffe unter hohem Energieeinsatz verarbeitet werden. Der komplexe Aufbau der Verbundsysteme macht zudem eine Anpassung an eine veränderte Nutzung sehr schwierig. Schließlich sind eine sortenreine Trennung und ein hochwertiges Recycling kaum möglich. Diese Ziele lassen sich leichter erreichen, wenn unterschiedliche Funktionalitäten in einem Baumaterial integriert werden können.

Ziel des Verbunds ist es, einen massiven mineralischen Baustein herzustellen, der neben der Funktion als tragende Struktur auch eine vollwertige Wärmedämmfunktion besitzt. Auf mineralischen Rohstoffen basierende, energieeffizient hergestellte und leicht rezyklierbare Werkstoffe wie Porenbeton erreichen allerdings heute bei üblichen Wandstärken noch nicht die Wärmedämmwerte, die einen Ersatz von Wärmedämmverbundsystemen auf Polystyrol-Basis oder Vakuumsystemen auf Basis von Aerogelen etc. gestatten. Dass es möglich ist, eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit auch auf Basis mineralischer Werkstoffe zu erzielen, zeigen aber gerade Aerogele.

Der Schlüssel zur Reduktion der Wärmeleitung liegt in der Verkleinerung der Festkörper- und der Gaswärmeleitfähigkeit. Die Festkörperwärmeleitfähigkeit lässt sich in Porenbeton durch einen optimierten Umsatz der Rohstoffe zu **Calciumsilikathydraten**, sogenannten C-S-H-Phasen reduzieren. Für die Gaswärmeleitfähigkeit sind die Porosität und das Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle zum Porendurchmesser (Knudsen-Zahl) entscheidend. Eine hohe Knudsen-Zahl und damit eine niedrige Wärmeleitfähigkeit kann durch eine Verschiebung der Porengrößen in den Nanometerbereich erreicht werden. Entsprechend sind für leichte Porenbetone mit über 90 Vol.-% Porosität Wärmeleitfähigkeit und Anzahl bzw. Verteilung der Poren direkt korreliert.

Wesentliches technisches Ziel des Verbunds ist es daher die Wärmeleitfähigkeit des mineralischen Baustoffs Porenbeton durch eine Verkleinerung der Porengröße auf ca. 100 nm drastisch zu reduzieren. Die Bereitstellung der Porosität soll dabei nicht, wie im klassischen Porenbetonprozess, durch Wasserstoffbildung erfolgen. Stattdessen wird ein hochporöser Leichtzuschlag aus C-S-H eingesetzt, der an das mechanische Gerüst des Porenbetons, das ebenfalls aus C-S-H-Phasen besteht, anbindet und dessen mechanische Stabilität verstärkt.

Möglich wird die Herstellung eines solchen Leichtzuschlags aus C-S-H durch den Einsatz eines neuen ressourceneffizient hergestellten Bindemitteltyps, den hydraulischen Calciumhydroxysilikaten (Markenname „Celiment“). Speziell zu entwickelnde hydraulische Calciumhydroxysilikate (h-CHS) mit hoher spezifischer Oberfläche reagieren bei der Zugabe von Wasser unter Bildung von C-S-H, wobei selbstorganisiert ein homogener nanoporöser Werkstoff (ca. 100 nm Porendurchmesser) erzeugt werden kann (Bild 1), der, als Leichtzuschlag eingesetzt, die Makroporosität des konventionellen Porenbetons ersetzt. Das Bauteil entsteht letztlich nach einer abschließenden Dampfhärtung, wie dies aus der konventionellen Porenbetonherstellung bekannt ist.

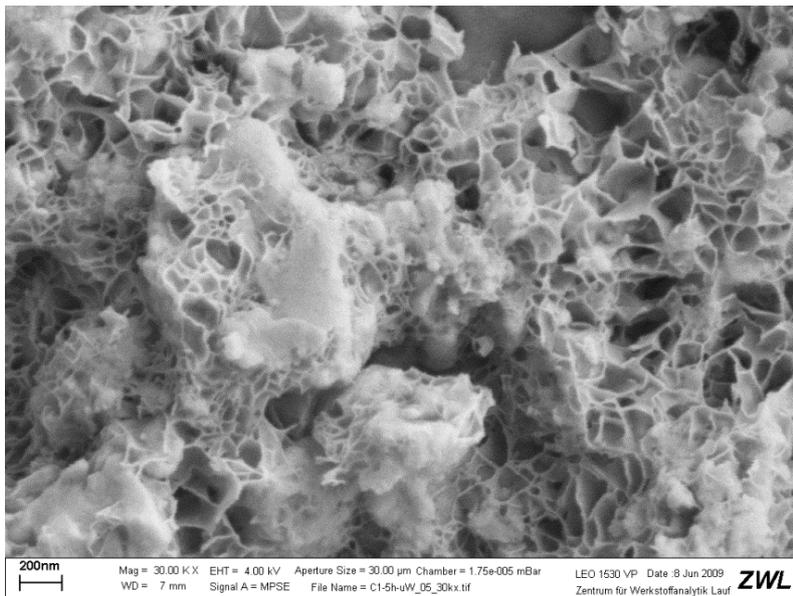


Bild 1: Nanoporöses Gefüge aus C-S-H nach Hydratation von h-CHS Binder mit  $w/z = 1$

Im Lebenszyklus eines Gebäudes entfällt der größte Energieverbrauch auf die Nutzungsphase. Etwa 30% des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfallen alleine auf Raumwärme bzw. Raumkühlung. Optimierte nanoporöse Hochleistungsdämmstoffe für Gebäude sind daher ein zentraler Punkt des Förderkonzepts „Energieoptimiertes Bauen“ des BMWi, dessen Umsetzung eine Voraussetzung dafür darstellt, dass die Ziele des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung erreicht werden können. Dabei müssen, neben dem technisch möglichen, auch die Kosten, eine effiziente Ressourcennutzung und die Vermeidung von Belastungen für die Umwelt berücksichtigt werden. Das Vorhaben zielt auf einen Hochleistungsbaustoff, der durch die Porenbetonindustrie aus weithin verfügbaren mineralischen Rohstoffen dezentral hergestellt werden kann.

Da das Produkt chemisch homogen ist, kann es einfach rezykliert werden. Damit werden natürliche Ressourcen gespart und Abfälle vermieden. Die EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EC, die bis Ende 2020 umgesetzt werden muss, sieht eine Recyclingquote von 70 % für Bau- und Abbruchabfälle vor. Ziel der Richtlinie ist es, Umwelt, menschliche Gesundheit und Ressourcen zu schützen. Sie soll die EU dem Ziel einer "Recycling-Gesellschaft" näher bringen, in der Abfall als Rohstoff genutzt wird. Neue rein mineralische nanoporöse Füllstoffe in Porenbeton können dabei helfen, dieses Ziel zu erreichen.

### **3 Stand von Wissenschaft und Technik**

#### **3.1 Porenbeton**

Die werkstofflichen Vorteile von Porenbeton als Baumaterial liegen insbesondere in der leichten Verarbeitbarkeit, dem Brandschutz, dem Feuchtigkeitsverhalten („diffusionsoffen“), der Wiederverwertbarkeit, der Alterungsbeständigkeit und der Schädlingsresistenz. Durch kontinuierliche Materialinnovationen weisen hochwertige Porenbetonprodukte heute als Baumaterial gute bauphysikalische Eigenschaften, insbesondere relativ hohe Druckfestigkeiten ( $> 2,5 \text{ N/mm}^2$  Steindruckfestigkeit) bei relativ geringer Rohdichte (ca.  $350 \text{ kg/m}^3$ ) und relativ geringer Wärmeleitfähigkeit ( $0,08 \text{ W/mK}$ ) auf. Ziel der Weiterentwicklungen ist, mit mineralischen Zusätzen und damit ohne Verzicht auf wesentliche Alleinstellungsmerkmale des Baustoffs die Wärmeleitfähigkeit (WLF) auf einen Wert von  $0,07 \text{ W/(mK)}$  oder niedriger zu senken, wobei die Normfestigkeit ( $> 2,5 \text{ N/mm}^2$  Steindruckfestigkeit) beibehalten werden soll.

Bisher wurde dieses Ziel durch eine Reduktion der Rohdichte und gleichzeitige Erhöhung der Festigkeit der Stegmatrix verfolgt. Zusätzlich wurde die Wärmeleitfähigkeit der Stegmatrix reduziert. Allerdings ist die maximale Festigkeit der Stegmatrix erreicht (maximaler Bindemittelgehalt). Schwachstellen sind die Treibporen. Diese Hohlräume sollen mit Leichtzuschlägen geringer Wärmeleitfähigkeit und höherer Stabilität (Druckfestigkeit) ersetzt werden. Die auf dem Markt verfügbaren Leichtzuschläge führen aber parallel zur Absenkung der Wärmeleitfähigkeit immer zu einer Absenkung der Druckfestigkeit und/oder zu einer erhöhten Schwindung und Sorptionsfeuchte (Materialausgleichsfeuchte mit der Atmosphäre) des fertigen Porenbetonmaterials. Eine Erhöhung der Sorptionsfeuchte bringt normativ bei der Wärmeleitfähigkeit einen erhöhten Feuchtezuschlag ( $F_m$ ) mit sich. Zwar wird ein niedrigerer  $\lambda_{10, \text{tr}}$ -Messwert erzielt, der Bemessungswert ( $\lambda_R$  bzw.  $\lambda_{\text{design}}$ ) bleibt aber der gleiche. Die derzeit auf dem Porenbetonmarkt verfügbare geringste Wärmeleitfähigkeitsgruppe ist die mit  $0,07 \text{ W/(mK)}$ . Dieser Porenbeton entspricht der Festigkeitsklasse P1.6.

#### **3.2 Celitement**

Auf hydraulischen Calciumhydrosilikat (h-CHS) basierende Binder sind eine proprietäre Entwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie. Ihre Anwendung ist unter dem Namen Celitement exklusiv an die Celitement GmbH lizenziert. Die Bindemittel zeichnen sich durch einen gegenüber Portlandzement etwa halbierten Einsatz von Energie und  $\text{CO}_2$ -Emission in der Herstellung aus. Ausgehärtete Produkte bestehen ausschließlich aus C-S-H-Phasen. Damit ist die Herstellung neuer zementgebundener Materialien möglich.

In dem zweistufigen Herstellungsverfahren werden zunächst, analog zur Härtung von Porenbeton, nicht hydraulische C-S-H-Phasen als Zwischenprodukt in einem Autoklaven hergestellt. Das

Zwischenprodukt kann dabei mineralogisch z.B. aus  $\alpha$ - $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$  (kurz  $\alpha$ - $\text{C}_2\text{SH}$ ), Jaffeite ( $\text{Ca}_6\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_6$ ), C-S-H(I) oder Afwillit ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_6$ ) bestehen. Die Struktur des Zwischenprodukts lässt sich über die eingesetzte Rezeptur und die Prozessparameter des Autoklavenprozesses steuern. Essentiell für die Rezeptur sind vor allem das  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ -Verhältnis, der Gehalt an Nebenelementen wie Alkalien, Aluminium und Eisen sowie der Spurenelementgehalt. Wesentliche Prozessparameter sind die Menge des im Prozess verfügbaren Wassers, die Steuerung der Kristallisationskinetik durch die Zugabe von ausgewählten Kristallisationskeimen sowie das Temperaturprofil und die Prozessdauer. Das KIT verfügt über ein breites Spektrum an Versuchsdaten aus einem Laborautoklaven, in dem unterschiedliche Zwischenprodukte hergestellt werden können. Die Celitement GmbH betreibt eine Pilotanlage, in der Produktchargen von ca. 100 kg hergestellt werden. Die Ergebnisse von Versuchen des Laborautoklaven sind auf den Autoklaven der Pilotanlage übertragbar.

In einem zweiten Schritt wird das Zwischenprodukt mit einem mineralischen silikatischen Rohstoff wie z. B. Quarz, Hüttensand, Glas etc. gemischt und in einer Mühle vermahlen. Dabei entsteht der Calciumhydrosilikat-Binder aus hydraulischem Calciumhydrosilikat. Art und Menge des h-CHS-Binders hängen insbesondere von der Art des eingesetzten Zwischenprodukts, von der Art des zugemahlten mineralischen, silikatischen Rohstoffs und weiteren Prozessparametern ab. Wesentlich für die Funktion als zementäres Bindemittel ist die Reduktion der spezifischen Oberfläche durch Anlagerung von aktiviertem Zwischenprodukt um Kerne aus silikatischen Zuschlagstoff. Ohne eine entsprechende Verringerung der spezifischen Oberfläche wird sehr viel Wasser zur Benetzung der Oberfläche benötigt, was zu einer schnellen Reaktion unter Ausbildung eines hochporösen Gefüges niedrigerer Festigkeit führt. Das fertige Produkt, Celitement, kann also aus unterschiedlichen Calciumhydrosilikaten bestehen. Allen Produkten gemeinsam ist, dass sie bei Zugabe von Wasser unter Freisetzung von Wärme zu C-S-H reagieren. C-S-H sind die Mineralphasen, die auch für die Festigkeit von aus konventionellem Zement hergestelltem Zementstein, Mörtel bzw. Beton verantwortlich sind. C-S-H-Phasen sind auch der festigkeitsbestimmende Hauptbestandteil von Porenbeton.

#### 4 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Verbunds

Der vorgeschlagene Lösungsansatz zur Herstellung von nanoporösem Leichtzuschlag auf Basis von C-S-H-Körnern ist schematisch in Bild 2 skizziert.

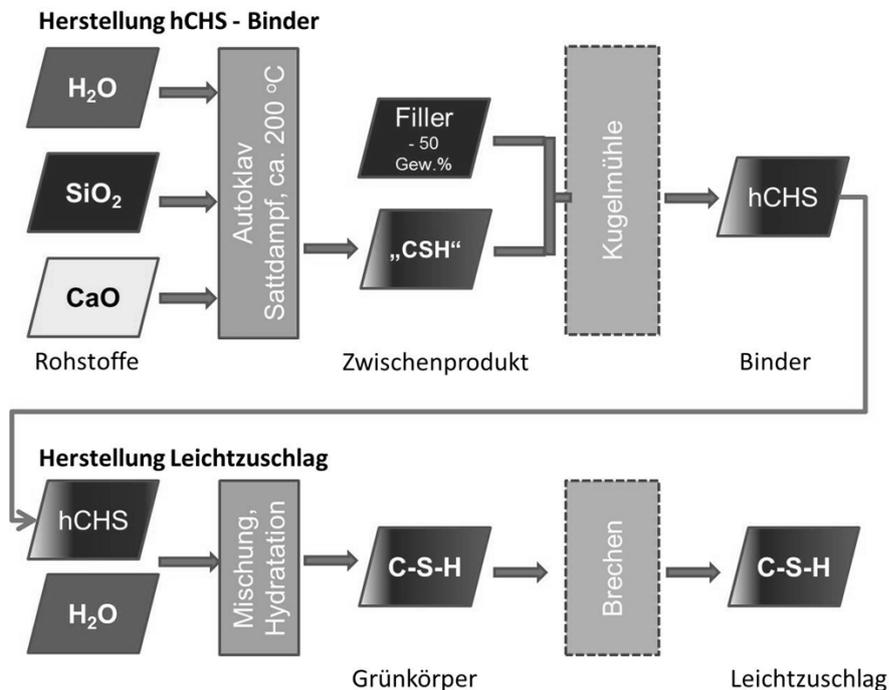


Bild 2: Schema zur Herstellung von Leichtzuschlag für Porenbeton

Der Prozess beginnt mit der Herstellung eines geeigneten hydraulischen Binders auf Basis von h-CHS. Aus den Rohstoffen wird in einem Autoklaven ein Zwischenprodukt aus CSH hergestellt und mit einem Filler zu einem h-CHS-Binder vermahlen. Der h-CHS wird zur Herstellung von Leichtzuschlag mit Wasser versetzt. Der entstehende C-S-H-Körper wird gebrochen und als Leichtzuschlag in der Porenbetonherstellung eingesetzt. Ein wesentlicher Meilenstein besteht in der Entwicklung eines Calciumhydrosilikat-Binders mit hoher Oberfläche, der zur Herstellung von nanoporösen Leichtzuschlag geeignet ist. Dieser muss anschließend so verarbeitet werden, dass Leichtzuschläge mit homogener nanoporöse Zellmorphologie bei niedriger Dichte und hinreichender mechanischer Stabilität entstehen.

Die hergestellten Zuschläge werden anschließend mit einem noch zu entwickelnden Verfahren homogen in ein grünes Porenbetonsystem eingebracht werden und sollen ohne Porenvergrößerung, Rissentwicklung etc. im Autoklaven aushärten. In diesem Fall sollte die Porenmorphologie und Größe mit der Wärmeleitfähigkeit des Systems korrelieren. Gleichzeitig werden Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Fertigungstechnologie geprüft. Die entwickelten Technologien werden über LCA auf ihre Nachhaltigkeit untersucht.

#### 5 Vorteile

Die Einbindung von bis zu 80 Vol.% Leichtzuschlägen mit homogener nanoporöse Zellmorphologie bei niedriger Dichte und hinreichender mechanischer Stabilität aus reinem, nicht zu Tobermorit kristallisiertem C-S-H verspricht, die Materialeigenschaften des Produkts Porenbeton deutlich zu verbessern, ohne Materialgrenzen und chemische Inhomogenitäten zu induzieren. Die Technologie zur Herstellung des Porenbetonsteins bleibt nahezu unverändert. Andere mineralische Leichtzuschläge wie Blähton, Vermiculit, etc. sind dagegen nicht zur homogenen Einbindung in das Porenbetongefüge geeignet.

Der vorgeschlagene Ansatz zur Herstellung nanoporösen Porenbetons ist erst seit der Entdeckung und technischen Entwicklung hydraulischer Calciumhydrosilikate („Celitelemente“) möglich. Konventionelle Zemente bilden als Hydratationsprodukte neben C-S-H-Phasen 50% Nebenphasen wie Portlandit, Calciumaluminhydrat etc. Solche Systeme lassen sich zwar schäumen, allerdings ist über Schaumbildung eine Porengröße im Nanometerbereich, wie sie über die Selbstorganisation bei der Hydratation von Calciumhydrosilikat-Binder zu C-S-H-Phasen entsteht, nicht zu erzielen. Da „grüner“ Porenbeton und Celitelement-Produkte eine identische Zusammensetzung und die C-S-H-Anteile eine identische Struktur besitzen, sind auch chemische Reaktivität und mechanische Kenngrößen wie z. B. thermische Ausdehnung gleich. Das Gefüge heilt nahezu vollständig aus – eine chemisch hervorragende Ankopplung ist möglich. Der in der Porenbetonindustrie gängige Ansatz Porenbetonspalt zu verwenden, d. h. rezykliertes, gehärtetes Porenbetonmaterial, senkt hingegen die Druckfestigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit bleibt weitgehend unbeeinflusst. Die Mechanismen sind noch nicht vollständig geklärt. Die geringe Hydratationswärme von Celitelement ermöglicht eine schnelle Härtung ohne die Gefahr der Rissbildung. Der schnell erzielbare Reaktionsumsatz verhindert Nachhärten.

## **6 Verbundpartner**

Das Konsortium spiegelt in seiner Zusammensetzung das breite Spektrum an Know-How wieder, dass für den Erfolg des Vorhabens notwendig ist: Mit Xella ist der im Markt führende Systemhersteller für Porenbeton beteiligt, der einerseits die wissenschaftlichen und technologischen Voraussetzungen zur Herstellung von Porenbeton einbringt und der die Anforderungen des Marktes kennt. Zum anderen kann Xella im Erfolgsfall ein schneller Technologietransfer in den Markt gelingen.

Die zweite entscheidende Komponente für den Erfolg des Verbunds ist die Weiterentwicklung des neuen Bindemittels Celitelement als Ausgangsstoff für einen nanoporösen Leichtzuschlag. Die hohen analytischen Hürden machen den Einsatz anspruchsvoller Methoden notwendig, die zum Teil synchrotron-basiert sind und in den letzten Jahren durch den Partner KIT entwickelt wurden. Essentiell ist auch das in 15 Jahren Grundlagenforschung aufgebaute Wissen zur Bildung und zu Eigenschaften von C-S-H-Phasen.

Die dritte essentielle Komponente für den Erfolg des Vorhabens ist die Herstellung des entwickelten neuen Bindemittels für die Applikation Leichtzuschlag im Pilotmaßstab. Die Celitelement GmbH entwickelt das Herstellungsverfahren kontinuierlich weiter und betreibt die weltweit einzige Pilotanlage. Im Jahr 2018 ist der Bau einer ersten industriellen Produktion geplant, die den Rohstoff für die Herstellung von nanoporösem Porenbeton liefern wird.

## 7 Literatur

- /1/ Bave, G.: Aerated light weight concrete-current technology. In: Proceedings of the Second International Symposium on Lightweight Concretes. London (1980).
- /2/ Kreft, O.: Pore Size Distribution Effects on the Thermal Conductivity of Light Weight AAC.- Conference Proceedings 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete 14. – 17.09.2011, Bydgoszcz / Poland
- /3/ Narayanan N., Ramamurthy K.. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement & Concrete Composites. 22 (2000), 321-329.
- /4/ Stemmermann,P.; Schweike,U.;Garbev,K.;Beuchle,G.;Möller,H.: Celitement – eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie.-Cement International 8 (2010), 5, 52-66.
- /5/ Stemmermann,P.; Achternbosch,M.: Dekarbonisierung im Baustoffsektor.- In: Jörg Hacker (Hg.): Rolle der Wissenschaft im globalen Wandel, 29.9.2012. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina. Stuttgart (Nova Acta Leopoldina NF, 118 (2013), Nr. 400), S. 313–332.
- /6/ Straube B. & Walther H. AAC with low thermal conductivity: Conference Proceedings 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete 14. – 17.09.2011, Bydgoszcz / Poland
- /7/ Stumm, A.: Cement and sulphate free AAC: A; Conference Proceedings 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete 14. – 17.09.2011, Bydgoszcz / Poland
- /8/ Tran L. Strahlungseffekte bei instationären Heizdraht-messungen an porösen Wärmedämmstoffen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg (2002).

# Mikro-Hohlglaskugeln als Basis energieeffizienter Dämmung von Gebäuden

ECOSPHERE

Friedbert Scharfe

*Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co.*

Dr. Thorsten Gerdes, Benedikt Scharfe, Johanna Zimmermann, Laura Schwinger  
*Universität Bayreuth*

Christin Riechert, Dr. Hans-Bertram Fischer  
*Bauhaus-Universität Weimar - FIB*

Dr. Friedrich Wolff, Dr. Bernd Gangnus, Dr. Zipplies  
*Dyneon/3M*

## 1 Mirko-Hohlglaskugeln (MHGK) als Basis energieeffizienter Dämmung von Gebäuden

Das Projekt EcoSphere beinhaltet vier Projektpartner und wurde demnach in 4 Arbeitspakete unterteilt:

- **AP1:** Entwicklung & Herstellung der MHGK-haltige Baustoffe (Franken Maxit)
- **AP2:** Beschichtung & Funktionalisierung von MHGK (Universität Bayreuth)
- **AP3:** Untersuchung der bauphysikalischen Eigenschaften (FIB)
- **AP4:** Energieeinsparpotentiale, LCA & Recycling (3M)

## 2 Angaben zu den Institutionen

### 2.1 Franken Maxit:

Die Firma Franken Maxit wurde im Jahr 1978 vom Kalkwerk Bergmann in Azendorf und der Firma Mathis in Freiburg gegründet. Nach Übernahmen und Wechseln der Gesellschafter gehört die Firma heute zu gleichen Anteilen dem Kalkwerk Bergmann und der Firma Saint-Gobain Weber. In den 35 Jahren seit Gründung hat sich das Unternehmen von einer Firma mit 10 Angestellten und einem Werk zu einer Firma mit 550 Mitarbeitern in insgesamt 9 Produktionsstandorten in Bayern, Thüringen, Sachsen sowie in der Tschechischen Republik entwickelt und ist im Großteil seines Verkaufsgebietes Marktführer im Bereich Baustoffe für den Gebäudebereich. Dieses Wachstum und Marktdurchdringung hat die Firma seiner Innovationskraft und –geschwindigkeit zu verdanken und bietet heute über 600 Produkte für den Gebäudebereich an. Zu diesen Innovationen zählen die Einführung von Trockenmörtel im Jahr 1978, die Entwicklung eines deckenden Dünnbettmörtels in den 90er Jahren, die Entwicklung einer Farbe mit Energiespareffekt durch die Verwendung von Mikrohohlglaskugeln im Jahr 2004, für das das Unternehmen mit dem Bayrischen Innovationspreis geehrt wurde, sowie aktuelle Entwicklungen wie Wandheizungen sowie eines Bindemittels für Putze mit niedrigem Energieaufwand in der Herstellung. Diese Innovationen im Bereich Energieersparnis bei Herstellung und Verwendung der Baustoffe wurden in Projekten zusammen mit verschiedenen Partnern realisiert, z.B. im Bayerischen Forschungsverbund FORGLAS.

## **2.2 Universität Bayreuth:**

Der Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung an der Universität Bayreuth nimmt in Forschung und Lehre eine Brückenfunktion zwischen Materialwissenschaft und Verfahrenstechnik ein. Ziel der Entwicklung neuer Verfahren zur Synthese und Verarbeitung von Materialien ist die energetische Optimierung des Gesamtprozesses sowie die Einstellung von Materialfunktionen, die mit bestehenden Prozessen nicht zugänglich gewesen sind. Einen Schwerpunkt liegt auf der Herstellung und Verarbeitung glasbasierter Produkte für den Gebäudebereich. Der Lehrstuhl verfügt über eine kontinuierliche Glasschmelzanlage mit einer Kapazität von 150 kg/Tag am Standort Bayreuth, ein weiteres Schmelz- und Formungsaggregat steht im Technologieanwenderzentrum Spiegelau TAZ zur Verfügung. Von der Laborschmelze bis in den Pilotmaßstab können so auch Glasflakes und -kugeln produziert werden und anschließend z.B. durch eine Beschichtung veredelt werden. Im Rahmen des BFS-Forschungsverbundes FORGLAS ([www.Forglas.de](http://www.Forglas.de)) wurden so im Zeitraum 2009 bis 2012 Multifunktionsmaterialien auf Basis von Glas für energieeffiziente Gebäudetechnologien entwickelt, unter anderem auf Basis disperser und poröse Glasmaterialien.

Als Spin-off des bayerischen Verbundprojektes wurde 2012 das EU-Projekt HARWIN (<http://www.harwin-fp7.eu>) gestartet, mit dem Ziel, Fenster und Rahmen mit erheblich reduziertem Gewicht und gegenüber dem Stand der Technik reduzierten U-Werten zu entwickeln. Das multinationale Projekt wird vom Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung koordiniert.

Die im vorliegenden Antrag beschriebenen Entwicklungen von MHGK-basierten Dämmstoffen und Bauchemikalien bilden damit einen weiteren wichtigen Baustein bei der Konzeption des Lehrstuhls für den Einsatz multifunktionaler glasbasierter Werkstoffe in der Gebäudetechnik.

## **2.3 FIB:**

Das F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) der Bauhaus-Universität Weimar verfügt über langjährige Erfahrungen im Bereich der angewandten Forschung auf dem Gebiet der anorganischen Bindemittel. Im Speziellen besitzt der FuE-Verantwortliche Dr. H.-B. Fischer zudem weit reichende Sachkenntnisse im Bereich der Calciumsulfatbaustoffe sowie deren Anwendung. Darüber hinaus wurde im Rahmen eines ZIM-Projektes der als Grundlage für die Entwicklung des Dämmputzes dienende GZP-Putz am FIB in Kooperation mit der Firma Franken-Maxit entwickelt. Die erforderliche gerätetechnische Ausrüstung sowie erfahrenes Laborpersonal sind am FIB vorhanden.

Im Rahmen eines ZIM-Projektes („Bindemittelsysteme auf Basis energieeffizienter und nachhaltiger Rohstoffe mit erhöhter Feuchteresistenz“, Förderkennzeichen: KF2155705KI9) wurde ein System auf Basis der GZP-Bindemittel für Putz- und Mauermörtelanwendungen entwickelt. Projektpartner waren neben den FIB die Firmen Franken-Maxit sowie Bernhard Göhl GmbH. Durch eine gezielte Kombination der einzelnen Komponenten wurden rissfrei erhärtende Putz- und Mauermörtel mit einer hohen Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit konzipiert. Im Zuge steigender Kosten für Rohstoffe zur Energiegewinnung und den damit verbundenen Mehrkosten bei der Herstellung gebrauchsfertiger Produkte, ließen sich durch die Verwendung dieser Systeme neben einer Senkung des CO<sub>2</sub>-Emission durch die universellen Einsatzmöglichkeiten zudem wirtschaftliche Interessen - durch einen geringeren Zeit- und Arbeitsaufwand durch fehlende Notwendigkeit eines Putzsystemwechsels - verwirklichen.

## **2.4 Dyneon/3M:**

Dyneon wurde am 1. August 1996 als Joint Venture zwischen 3M und der Hoechst AG gegründet und beschäftigt inzwischen weltweit über 800 Mitarbeiter. Das Unternehmen ist in die 3 Geschäftsbereiche Fluorelastomere, Fluorkunststoffe, Spezial-Additive aufgeteilt und besitzt Verkaufsniederlassungen oder Repräsentanz in über 50 Ländern. Seit Dezember 1999 ist Dyneon eine 100% ige Tochtergesellschaft von 3M. 3M ist Weltmarktführer im Bereich Entwicklung, Herstellung und Vermarktung von Mikro-Hohlglaskugeln.

Die unter dem Handelsnamen 3M™ Glass Bubbles bekannten Produkte werden in bauchemischen Produkten wie Klebern oder Dichtmassen bereits heute erfolgreich eingesetzt.

Insbesondere dauerelastische Dichtungsmassen (Silikondichtstoffe) und selbstnivellierende Ausgleichsmassen lassen sich durch die verbesserte Fließfähigkeit und den verminderten Schrumpf erheblich verbessern. Durch die Zugabe von 3M™ Glass Bubbles kann zudem die Viskosität zuverlässig gesteuert werden.

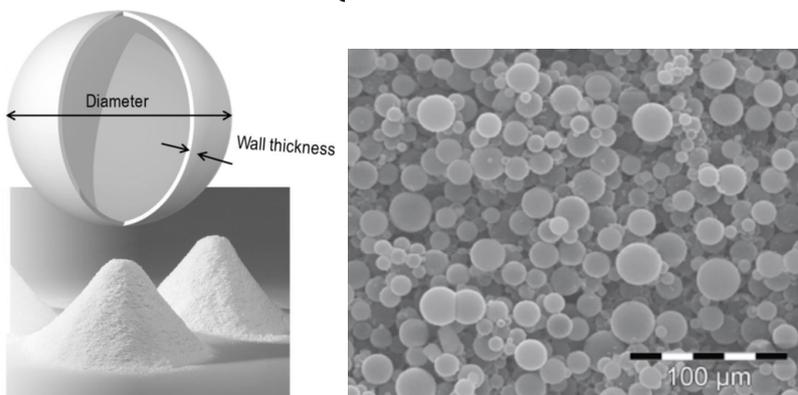
Leichte Spachtelmassen mit 3M™ Glass Bubbles helfen Handwerkern Probleme wie Schrumpf, Rissbildung, langsames Trocknen, Auslaufen und keine gute Schleifbarkeit zu vermeiden. Diese nicht schrumpfenden Fertigprodukte ersparen dem professionellen Handwerker 35 – 50% der Arbeitszeit.

### 3 Ziel des Gesamtprojektes

Ziel des Gesamtprojektes ist die Entwicklung einer Produktfamilie von Dämmstoffen auf Basis von Mikroholglaskugeln (MHGK), die neben sehr guten Dämmeigenschaften eine bisher nicht erreichbare Kombination von Materialeigenschaften aufweisen:

- Langzeitbeständigkeit
- Sehr gute Dampf- und Feuchteregulierung
- Vollständige Recyclierbarkeit
- Kostengünstige Herstellung der Komponenten
- Reduzierung von Emissionen (VOC, POC) während der Lebensdauer und beim Recycling
- Sehr gutes Lärmschutzverhalten
- Erhebliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit durch veränderte rheologische Eigenschaften der Baustoffe

Durch eine Reduzierung der Material- und Verarbeitungskosten sollen die im Projekt entwickelten Baustoffe eine Amortisation der Sanierungskosten in weniger als 10 Jahren ermöglichen.



3M Mikro-Hohlglaskugeln (MHGK) mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung (Quelle:3M)

# Thermisch wirksame Bauelemente für das Mauerwerk

THELMA

Hubert Fritschi

*Schöck Bauteile GmbH*

Michael Haist

*Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Materialprüfungs- und  
Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

## 1 Zielsetzung des Projekts

Der Gesamtenergiebedarf in Deutschland wird in hohem Maße durch den Energieaufwand für die winterliche Beheizung und zukünftig verstärkt auch für die sommerliche Kühlung von Gebäuden bestimmt. Bei der Minimierung dieses Energieaufwands spielt die Hülle eines Gebäudes und hier insbesondere ihre wärmetechnische Dämmwirkung eine entscheidende Rolle. Dieser Herausforderung wurde in den vergangenen Jahren durch eine zunehmende Verschärfung der geltenden Regelwerke zur wärmetechnischen Isolierung von Gebäuden Rechnung getragen.

Die bauliche Umsetzung dieser Anforderungen ist heute geprägt durch die Verwendung großer Schichtdicken polymerer Dämmstoffe. Diese Wandaufbauten sind insbesondere im Sockelbereich von Gebäuden aus wärmetechnischer Sicht nur bedingt zielführend. Zum einen stellen Sockelbereiche infolge der dort vorliegenden geometrischen Randbedingungen grundsätzlich eine Wärmebrücke dar und erfordern daher eine gegenüber einfachen Wandquerschnitten verstärkte Wärmedämmung. Gleichzeitig ist durch die in diesen Bereichen eines Gebäudes nahezu unvermeidliche Durchfeuchtung des Dämmstoffes mit ausgeprägten Einbußen bei der Wärmedämmwirkung der Isoliermaterialien zu rechnen. Dieser Nachteil müsste bei konventionellen Ansätzen durch eine zusätzliche Verstärkung der Dämmstoffdicke ausgeglichen werden und hat bei Nichtbeachtung zur Folge, dass die daraus resultierende Wärmebrücke maßgeblich die Nachhaltigkeit der Dämmmaßnahme beeinflusst. Dem bislang existierenden Verbundansatz, d. h. der Aufteilung der Funktionen der Wärmedämmwirkung und der statischen Tragwirkung auf unterschiedliche Werkstoffe, sind daher physikalische Grenzen gesetzt. Fortschritte in Sachen Wärmedämmung können daher nur durch neuartige, weitgehend monolithische Bauelemente gemacht werden. Dies erfordert neben statischen und geometrischen Optimierungen auch eine grundlagenorientierte Betrachtung der Wärmetransportmechanismen im Hinblick auf die Entwicklung eines innovativen Werkstoffs.

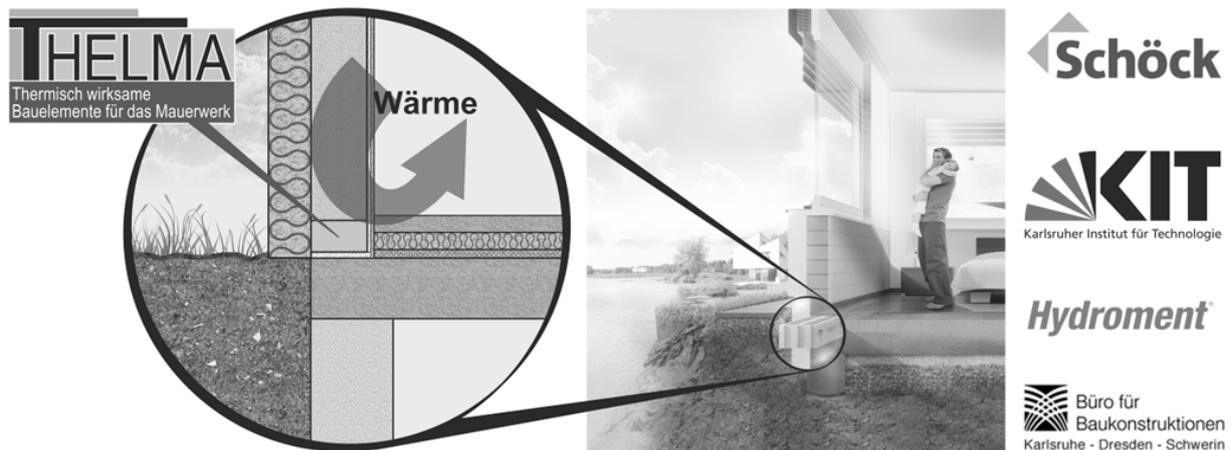


Bild 1 Schematische Darstellung des Einsatzgebiets von THELMA Mauerwerks-Sockelsteinen

Fig. 1 Schematic depiction of the goal of THELMA bricks

Zielsetzung des im Rahmen der HighTechMatBau-Initiative durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts THELMA ist es, vorgefertigte, überwiegend aus mineralischen Rohstoffen bestehende Bauelemente für Sockelkonstruktionen von Bauwerken zu entwickeln, die eine stark verbesserte Wärmedämmwirkung gegenüber herkömmlichen Sockelaufbauten aufweisen, in ihrer Wärmedämmwirkung unempfindlich auf ein äußeres Feuchteangebot reagieren, witterungsbeständig, dauerhaft und recycelbar sind und darüber hinaus eine hohe statische Tragwirkung aufweisen (siehe Bild 1).

Abweichend von üblichen bauphysikalischen Ansätzen, bei denen die schlechte Wärmedämmwirkung üblicher Betone durch Aufbringen eines Wärmedämmverbundsystems ausgeglichen wird, sollen im Projekt Betone mit überragender Dämmwirkung entwickelt werden, deren Isolationswirkung im zu entwickelnden Bauelement durch zusätzliche Integration gezielt angeordneter Wärmedämmkammern verbessert wird ohne die Tragfähigkeit des Elements zu reduzieren.

Das Projekt wurde zum 1. Juli 2015 bewilligt. Inzwischen fanden bereits intensive Abstimmungsgespräche zwischen den Projektpartnern sowie ein Kick-Off-Meeting statt. Das experimentelle Untersuchungsprogramm ist angelaufen. Über erste Ergebnisse des Projekts kann beim nächsten Statuskolloquium berichtet werden.

## 2 Angaben zu den Projektpartnern

- Dipl.-Ing. Hubert Fritschi, Fabian Marlok, MSc, Dipl.-Ing. Alexander Jurecka, Schöck Bauteile GmbH, Baden Baden, Verbundkoordinator, Kontakt: [hubert.fritschi@schoeck.de](mailto:hubert.fritschi@schoeck.de)
- Dr.-Ing. Michael Haist, Dr.-Ing. Viktória Malárics-Pfaff, Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe, Kontakt: [Michael.Haist@kit.edu](mailto:Michael.Haist@kit.edu)
- Prof. Dr. rer. nat. Frank Schilling, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Institut für angewandte Geowissenschaften, Kontakt: [frank.schilling@kit.edu](mailto:frank.schilling@kit.edu)
- Franz-Josef Strauß, Dipl.-Ing. Johannes Fuchs, Hydroment GmbH, Buchloe, Kontakt: [franz.josef.strauss@hydroment.de](mailto:franz.josef.strauss@hydroment.de)
- Dr.-Ing. Markus Hauer, Büro für Baukonstruktionen, Karlsruhe, Kontakt: [markus.hauer@bfb-ka.de](mailto:markus.hauer@bfb-ka.de)

Projektbeiträge aus der Förderinitiative

# **"NanoTecture - Nanotechnologie im Bauwesen"**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Bohrspitzen aus ultrahochfestem Beton

## BOHRSPITZEN AUS UHPC

Dr.-Ing. Karsten Beckhaus, Dr.-Ing. Hursit Ibuk

*BAUER Spezialtiefbau GmbH*

### 1 Einleitung

Ultrahochfester Beton (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) bietet sich aufgrund seiner Festigkeitseigenschaften für die Anwendungen im Bereich Spezialtiefbau an. Hier konkurriert UHPC im Allgemeinen mit dem Werkstoff Stahl, der in zahlreichen Spezialtiefbauanwendungen üblicherweise zum Einsatz kommt. Im Hinblick auf eine erfolgreiche Marktdurchdringung von UHPC-Anwendungen sind jedoch nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die ökonomischen und - heute zusätzlich - die ökologischen Aspekte des Werkstoffs von entscheidender Bedeutung.

Gegenstand des hier vorgestellten Forschungsprojekts ist die „Nutzbarmachung“ von UHPC im Spezialtiefbau. Bisher wurden Bohrspitzen aus UHPC für die Herstellung von Bohrpfählen in der Verdrängerpfahltechnik erforscht. Erste Praxisanwendungen verliefen sehr erfolgreich.

### 2 BAUER Gruppe und UHPC-Forschung

Bei der BAUER Gruppe handelt es sich um ein international tätiges Bau- und Maschinenbauunternehmen mit Sitz in Schrobenhausen, Deutschland, das seine Produkte und Dienstleistungen weltweit vermarktet. Die Aktivitäten der Gruppe sind in drei Segmente unterteilt: Bauleistungen, Maschinen und Ressourcen.

Das Unternehmen BAUER Spezialtiefbau GmbH, abgekürzt BST umfasst Spezialtiefbauleistungen u. a. für Baugruben, Gründungen, Dichtwände sowie die Baugrundverbesserung in aller Welt. Die BAUER Maschinen GmbH, abgekürzt BMA, entwickelt und fertigt Maschinen und Werkzeuge für den Spezialtiefbau und den Bereich Mining.

Das dritte Segment wird durch die BAUER Resources GmbH abgedeckt, welche sich auf Produkte und Dienstleistungen in den Bereichen Wasser, Energie, Bodenschätze und Umwelt konzentriert.

Insbesondere in den Tätigkeitsbereichen von BST und BMA kann die Anwendung von UHPC zur Entwicklung ökonomischer und ökologischer Produkte führen, die den heute üblicherweise verwendeten Werkstoff Stahl ersetzen können.

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts „UHPC im Spezialtiefbau“ BST und cbm (Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München) wurde die Eignung von Bohrspitzen aus UHPC untersucht und bewiesen. Das hier vorgestellte Forschungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ: 13N10456; Förderperiode: 2009 - 2012) gefördert.

### 3 Verdrängerpfahltechnik im „Lost-Bit-Verfahren“

Die Wahl des geeigneten Verfahrens zur Herstellung von Bohrpfählen aus Stahlbeton wird im Spezialtiefbau unter Berücksichtigung der anstehenden Bodenverhältnisse sowie wirtschaftlicher Aspekte getroffen. Insbesondere bei der Herstellung solcher Bohrpfähle in weichen bis steifen Böden kommt immer häufiger die Verdrängungspfahltechnik im „Lost-Bit-Verfahren“ als wirtschaftlich günstigere Alternative in Betracht.

Bei diesem Verfahren kommt eine Bohrspitze zum Einsatz. Ein für die Herstellung von Verdrängerpfählen ausgestattetes Drehbohrgerät liefert die erforderliche Energie (Kraft und Drehmoment) (Abb. 1). Zunächst wird der anstehende Boden unter dem Fußpunkt des Bohrgestänges

aufgebohrt. Nun wird das Bohrloch durch das Bohrgestänge nochmals auf seinen endgültigen Durchmesser aufgeweitet, indem der gelöste Boden radial in das umgebende Erdreich verdrängt wird. Die Bohrspitze muss ihre Aufgabe einmalig bis zum Erreichen der Endtiefe des Bohrpfahls erfüllen. Anschließend verbleibt sie im Erdreich. Auf diese Weise wird ein Bohrloch für den Einbau des Pfahlkörpers aus Stahlbeton vorbereitet. Nach diesem Schritt werden zur Herstellung eines einwandfreien Bohrpfahles die Bewehrung und der Beton im Schutze des hohlen Bohrgestänges eingebaut (Abb. 1, Abb. 2).



Abb. 1: Verdrängerpfahltechnik im „Lost-Bit-Verfahren“



Abb. 2: Klassische Stahlbohrspitze (links) mit horizontal liegendem hohlem Bohrgestänge (rechts)  
[Quelle: BMA-Produktprospekt „FDP Verdrängerpfahl-System“]

#### 4 Bohrspitzen aus ultrahochfestem Beton

Der klassische Werkstoff für Bohrspitzen ist Stahl (Abb. 2). Dieser könnte jedoch als Referenzmaterial für bestimmte Spezialtiefbauanwendungen durch UHPC ersetzt werden. Stahl ist das Referenzmaterial für mögliche Spezialtiefbauanwendungen aus UHPC. Im Spezialtiefbau gibt es verschiedene Anwendungsbereiche, in denen Stahl künftig durch UHPC ersetzt werden könnte. UHPC zeichnet sich durch sein dichtes Gefüge und damit durch eine hohe Dauerhaftigkeit aus. Darüber hinaus weist UHPC eine sehr hohe Druckfestigkeit auf, die rund fünfmal höher ist als die von Beton für tragende Elemente im Spezialtiefbau. Da bei der Herstellung von Verdrängerpfählen nicht nur gedrückt, sondern vor allem Drehmoment ausgeübt wird, ist für die Bohrspitze weniger die Druck- als vielmehr die Schubfestigkeit des UHPC maßgebend (Abb. 3). Aus diesem Grund wurde die Schubfestigkeit in einer eigenen Versuchsreihe untersucht.



Abb. 3: Schubfestigkeitsprüfung eines Prüfkörpers aus UHPC

Zur Sicherstellung eines adäquaten Bohrfortschritts muss der für die Bohrspitze verwendete UHPC darüber hinaus einen ausreichend hohen Verschleißwiderstand aufweisen. Daher wurden unterschiedliche UHPC-Zusammensetzungen unter Verwendung des allgemein bekannten Abriebscheibe nach Böhme geprüft [1]. Hierbei wird ein Prüfkörper einer definierten Schleifbeanspruchung ausgesetzt. Der kumulierte Abrieb wird als Dickenverlust angegeben. Das bedeutet, je geringer der Dickenverlust des Prüfkörpers, desto höher der Verschleißwiderstand. Neben weiteren Versuchsergebnissen ist hier der Einfluss des Hartstoffgehalts (Korund) der UHPC-Zusammensetzung auf den Verschleißwiderstand exemplarisch in Tab. 1 dargestellt. In dieser Versuchsreihe waren der Stahlfaseranteil (1,5 Vol.-%) und die Druckfestigkeit (200 MPa) stets konstant. Zunächst wurde beobachtet, dass der Korundgehalt von UHPC-Zusammensetzungen einen signifikanten Einfluss auf den Verschleißwiderstand hat. Selbst ein geringer Korundgehalt (50 kg/m<sup>3</sup>) führte zu einer enormen Verbesserung des Verschleißwiderstands.

Tab. 1: Durch Dickenverlust ermittelter Verschleißwiderstand von UHPC-Zusammensetzungen in Abhängigkeit vom Korundgehalt

| Korundgehalt<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\Delta l$<br>[mm] |
|--------------------------------------|--------------------|
| 0                                    | 1,32               |
| 50                                   | 0,92               |
| 100                                  | 0,83               |

Darüber hinaus wurde eine großtechnische Herstellung von UHPC-Anwendungen untersucht. In dem Versuchsprogramm wurden zudem wesentliche misch- und fördertechnische Einflüsse auf die Produktqualität erforscht.

Die Verwendung von Stahlfasern in UHPC-Mischungen verleiht dem Endprodukt eine höhere Duktilität. Aus diesem Grund kann auch für „Einweg“-UHPC-Bohrspitzen nicht auf Stahlfasern verzichtet werden, weil diese im Fall der Festigkeitsüberschreitung die Rissbreiten beschränken und ein Versagen verhindern müssen (Abb. 4).



Abb. 4 Bohrspitze aus UHPC (Italien 2010)

Bohrspitzen aus UHPC - mit eingebetteten Stahlfasern - zeichnen sich durch eine außerordentliche Korrosionsbeständigkeit aus, wodurch sie hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit einen großen technischen Vorteil gegenüber herkömmlichen Stahlspitzen bieten (Abb. 4). Die Bohrspitze selbst besteht nicht in Ihrem ganzen einschließenden Volumen aus UHPC, sondern ist materialoptimiert und somit im Inneren „hohl“. Dabei ist die Wandstärke in den stark beanspruchten Bereichen höher als in den weniger beanspruchten Bereichen.

UHPC-Bohrspitzen wurden bereits erfolgreich auf mehreren Baustellen in Italien und der Schweiz bei der Herstellung von Verdrängerpfählen mit einem Durchmesser von 620 mm eingesetzt. Auch bei mehrmaliger Verwendung in vergleichsweise schwer bohrbaren Böden zeigten sich dabei keine Risse im UHPC (Abb. 5). Auch die Abdichtung in der Fuge zwischen Bohrspitze und Bohrgestänge blieb voll funktionstüchtig, so dass kein Grundwasser von außen in den (hohlen) Bohrstrang eindringen konnte. Dies ermöglichte eine sachgerechte Durchführung des anschließenden Betoniervorgangs. Im Vergleich zur Stahlspitze konnten im Praxistest außerdem sehr gute, mindestens gleichwertige Abbohrreigenschaften nachgewiesen werden. Zwar wiesen die UHPC-Bohrspitzen geringe Verschleißspuren an der Oberfläche auf, diese sind jedoch für den Bohrvorgang unkritisch (Abb. 5).



Abb. 5: Bohrspitze aus UHPC nach Bohrvorgang

## 5 Schlussfolgerungen

Mit der untersuchten Bohrspitze für Verdrängerpfahlssysteme steht nunmehr ein erstes Produkt aus ultrahochfestem Beton (UHPC) zur Verfügung. Dieses Produkt dürfte durch seine hohe Ausführungsqualität und -sicherheit bei im Vergleich mit Stahlspitzen geringeren Herstellkosten gute Markchancen haben.

Im Vergleich zur Stahlspitze ist es technisch mindestens gleichwertig. Aufgrund der günstigeren CO<sub>2</sub>-Bilanz („carbon footprint“) ist es zudem umweltfreundlicher.

In Zukunft dürften UHPC-Produkte immer mehr an Bedeutung gewinnen, vor allem weil der Stahlpreis mittel- und vor allem langfristig verglichen mit dem Preis für UHPC signifikant ansteigen wird.

## 6 Literatur

- /1/ DIN EN 13892-3, Juli 2004. Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstands nach Böhme.

# Hochleistungsbeton für Alle - Nanotechnologisch optimierter, langlebiger, energieeffizienter und insbesondere anwendungs- freundlicher Hochleistungsbeton

OLAF

Thomas Deuse  
*Dyckerhoff GmbH*

Christian Drössler  
*Benno Drössler GmbH & Co. Bauunternehmung KG*

Dr. Ulrich Fischer  
*Evonik Industries AG*

## 1 Hochleistungsbeton

Hochleistungsbetone mit rund 5-facher Festigkeit im Vergleich zu Normalbeton sind zunehmend in der Lage metallische Werkstoffe zu substituieren. Ein dichtes Zementsteingefüge ermöglicht hohe mechanische Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit. UHPC Ultra High Performance Concrete entsprechend der Literatur erfordert außergewöhnliche feinteilige Rohstoffe, Mischtechnik sowie Nachbehandlung. Dies erschwert die Markteinführung in der Breite, die ohnehin durch aufwändige Zulassungen sehr zeit- und kostenaufwändig ist. Im Projekt OLAF wird der angestrebte anwendungsfreundliche Hochleistungsbeton durch ein vorgemischtes Bindemittel erreicht, in dem alle notwendigen Feinststoffe zu Erzielung einer dichten Packung in einem speziellen Pulvermischer im Zementwerk trocken homogenisiert werden. Das resultierende Compound besteht zu 59 % aus den im Projekt für geeignet befundenen Bindemittelbestandteilen und zu 41 % aus einem in der Betonindustrie nicht üblichen Quarzfeinsand. Dieses Bindemittelcompound können Betonwerke jetzt wie einen handelsüblichen Zement im Silo vorhalten und mit den gängigen Rohstoffen Sand, Kies und Splitt in den vorhandenen Zwangsmischern zu Hochleistungsbeton aufbereiten. Die für UHPC entsprechend der Literatur notwendigen besonders scherintensiven Hochleistungsmischer sind für den Einsatz des OLAF Compound 5941 nicht erforderlich.



Bild 1: Betonwerk

Fig. 1: Concrete plant

Gegenüber normalem Beton unterscheiden sich Hochleistungsbetone durch einen abgestuften feinteiligen mineralischen Bereich. Als reaktive Komponenten sind in UHPC Ultra High Performance Concrete entsprechend der Literatur Portlandzement sowie reaktives Siliciumdioxid enthalten. Ziel ist eine möglichst dichte Packung der Bestandteile, die durch eine besondere zusätzliche Reaktion eine weitere Verdichtung erfahren soll: bei der Hydratation setzt der Portlandzement während des Erstarrens und Erhärtens Calciumhydroxid frei, das dann mit reaktivem Siliciumdioxid zusätzliche Calcium-Silikat-Hydrate (CSH) = Zementstein bildet. Bezeichnet wird dies als puzzolanische Reaktion, abgeleitet von der italienischen Stadt Pozzuoli nahe Neapel, wo römischen Betone in der Antike bereits siliciumreiche Aschen des Vesuv enthielten. UHPC Ultra High Performance Concrete entsprechend der Literatur verwendet üblicherweise feinteilige Nebenstoffe aus der Ferrosiliciumherstellung, die aus Elektrofiltern gewonnen werden (silica fume). Erhöhung der Packungsdichte und die puzzolanische Reaktion sind die wesentlichen Eigenschaften. Aufgrund der vergleichsweise hohen Dosierung muss **silica fume** als Pulver dosiert werden, da die im Betonbau übliche Suspension mit 50% Feststoff infolge des niedrigen Wasser/Zement-Werts des UHPC ausscheidet.

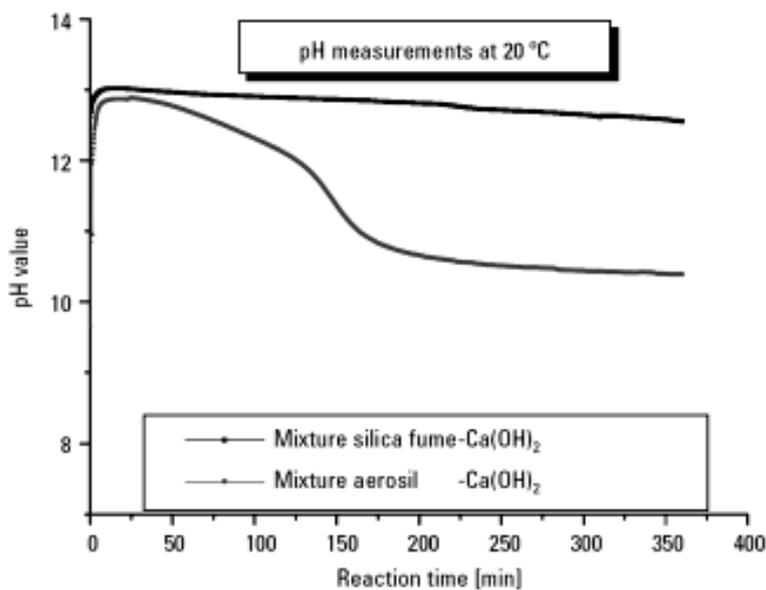


Bild 2: Pozzolanische Reaktion

Fig. 2: Pozzolanic reaction

Im OLAF Projekt wird die dichte Packung durch gesichtete Feinstzement Komponenten erreicht und für eine gezielt gesteuerte puzzolanische Reaktion kommen synthetisch hergestellte Oxide wie **Aerosil**<sup>®</sup> mit sehr hohem Qualitätsstandard zum Einsatz. Die Grafik zeigt das Absinken des pH-Werts bei Reaktion in einer gesättigten Calciumhydroxidlösung – silica fume (obere Kurve), aerosil<sup>®</sup> (untere Kurve). Das synthetische Oxid bildet mit dem Ca(OH)<sub>2</sub> aus der Zementhydratation also deutlich schneller CSH Phasen aus als das industrielle Nebenprodukt silica fume.

## 2 OLAF Bindemittel

Besondere Energieeffizienz wird erreicht, indem das von Dyckerhoff konzipierte Bindemittel über das von der aktuellen Zementnorm erlaubte Maß hinaus feinteilige Kompositbestandteile wie Hüttensand, Flugasche und Kalksteinmehl enthält. Die besondere Leistungsfähigkeit wird durch spezielle Sichtung vorgenannter Rohstoffe in Verbindung mit Aussteuerung der Hydratation durch nanostrukturierte synthetische Oxide der Evonik erreicht. Wichtig ist dazu eine gute Homogenität der feinteiligen Pulverkomponenten, die u.a. im Elektronenmikroskop labortechnisch kontrolliert wurde. Bei der

Produktion des OLAF Compound 5941 für den Demonstrator wurde die Kornverteilung durch Lasergranulometrie überwacht.

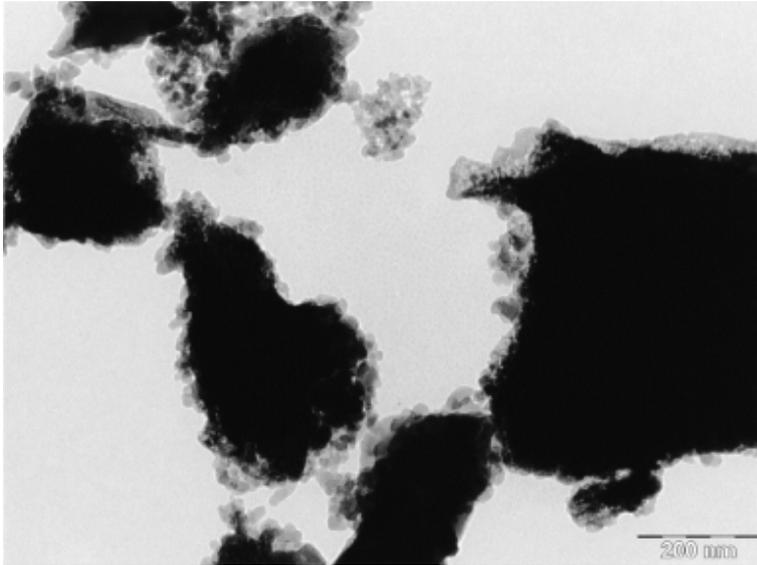


Bild 3: TEM Bild Zement und Oxide

Fig. 3: TEM picture of cement and oxides

### 3 Energieeffizienz

In einer Life Cycle Analyse konnte Evonik eine große CO<sub>2</sub> Einsparung nachweisen. Das OLAF Bindemittel mit weniger als 50% des CO<sub>2</sub>-intensiven Portlandzementklinkers zeigt im Beton hervorragende Gebrauchseigenschaften vergleichbar zu dem bereits praxiserprobten Dyckerhoff Nanodur<sup>®</sup> Beton.

Als Demonstratoren wurden zwei profilierte UHPC Fertigteilplatten auf Basis Nanodur<sup>®</sup> sowie OLAF Compound 5941 hergestellt und auf UHPC Keilen zur Ausbildung von Rampen geklebt. Gegenüber 15 cm konventionellem Stahlbeton war nur 6 cm UHPC mit 60 kg/m<sup>3</sup> Mikrostauffaser erforderlich. Der durch die höhere Leistungsfähigkeit deutlich geringere Materialeinsatz wirkt sich zudem auf den Transport der Fertigteile aus.

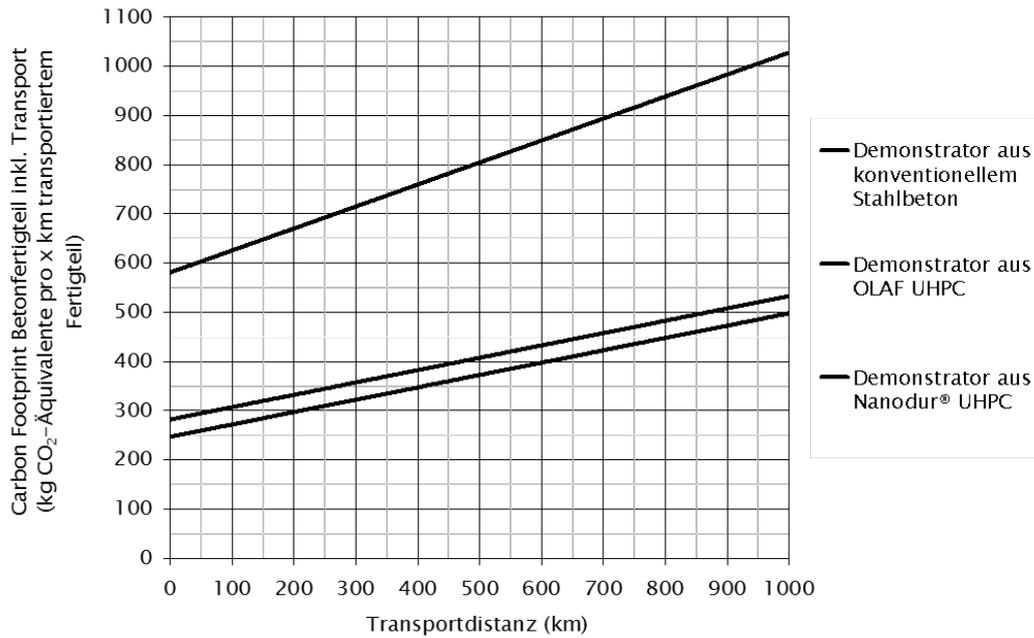


Bild 4: CO<sub>2</sub>-Äquivalent

Fig. 4 Carbon footprint



Bild 5: Fertigteilrampe

Fig. 5: Precast ramp

#### 4 Betontechnische Ergebnisse

In umfassenden vergleichenden Bindemittel- sowie Betonuntersuchungen in einer praxisbewährten Rezeptur mit Grubensand, Hartsteinsplitt und Microstahlfasern wurde nachgewiesen, dass sowohl die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul, Druck- und Biegezugfestigkeit als auch Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Widerstand gegen Frost-Tausalz dem praxisbewährten Nanodur® Beton entsprechen.

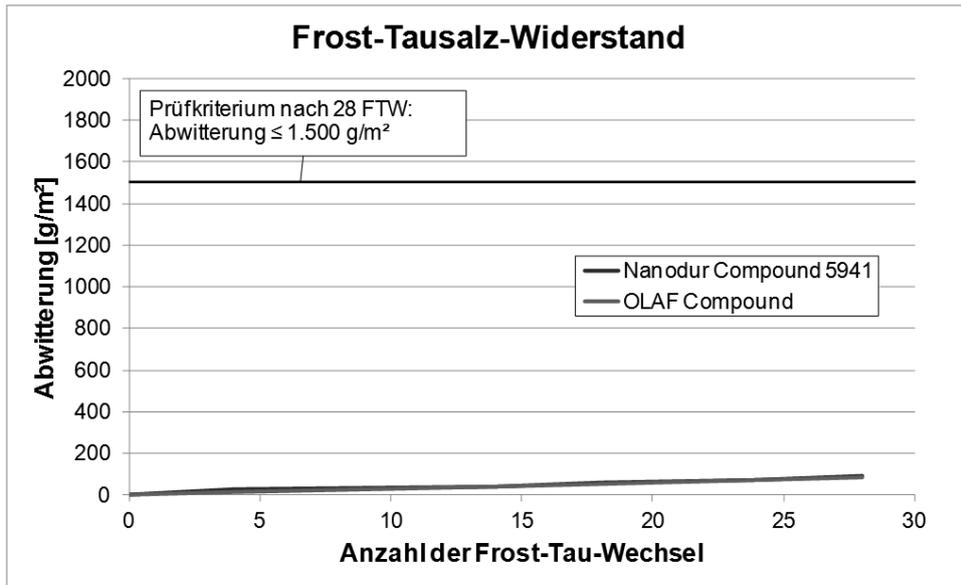


Bild 6: Frost-Tausalz-Widerstand

Fig. 6: Freeze-thaw-resistance

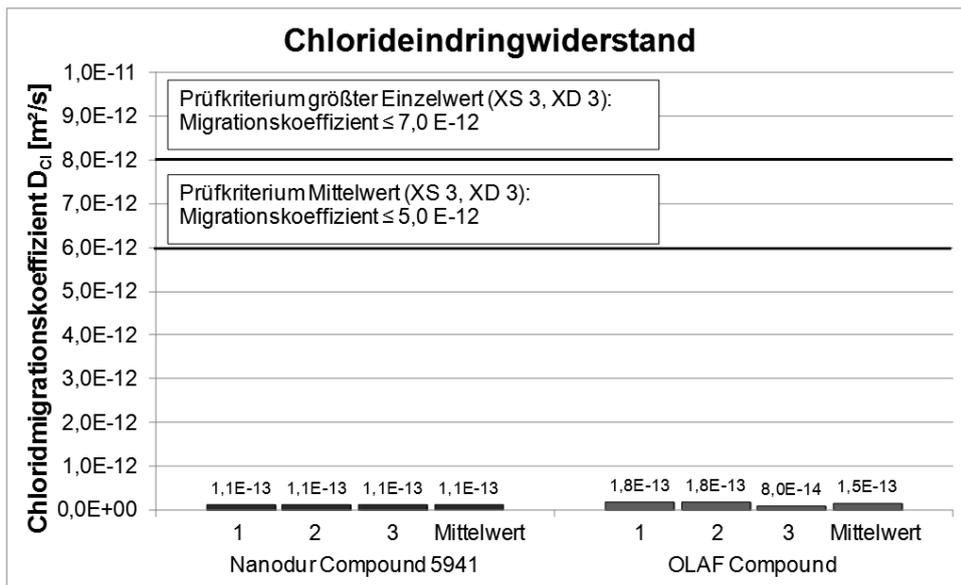


Bild 7: Chlorideindringwiderstand

Fig. 7: Chloride resistance

Kriechbelastung und Klimawechsellaagerung zeigten ebenfalls, dass mit ausgewählter Zusammensetzung des Bindemittels und dessen Hydratationssteuerung durch nanostrukturierte synthetische Oxide hochwertige Betone mit außergewöhnlichen Eigenschaften möglich sind. Die Klimawechsellaagerung an der Bauhaus Universität Weimar mit der AKR sensiblen Gesteinskörnung Granodiorit erstreckte sich in 16 Zyklen über 1 Jahr, ohne dass nennenswerte Dehnungen festzustellen waren.



Bild 8: Untersuchung Kriechverformung

Fig. 8: Creep deformation test



Bild 9: Klimasimulationskammer

Fig. 9: Climate simulation chamber

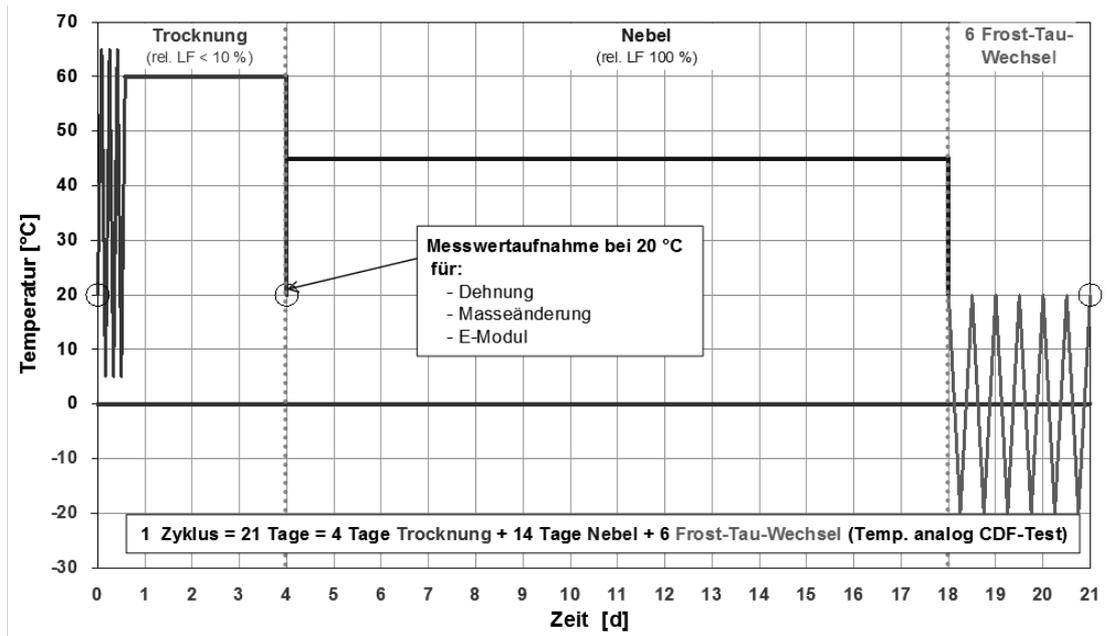


Bild 10: Klimwechsellagerung

Fig. 10: Climate changing storage

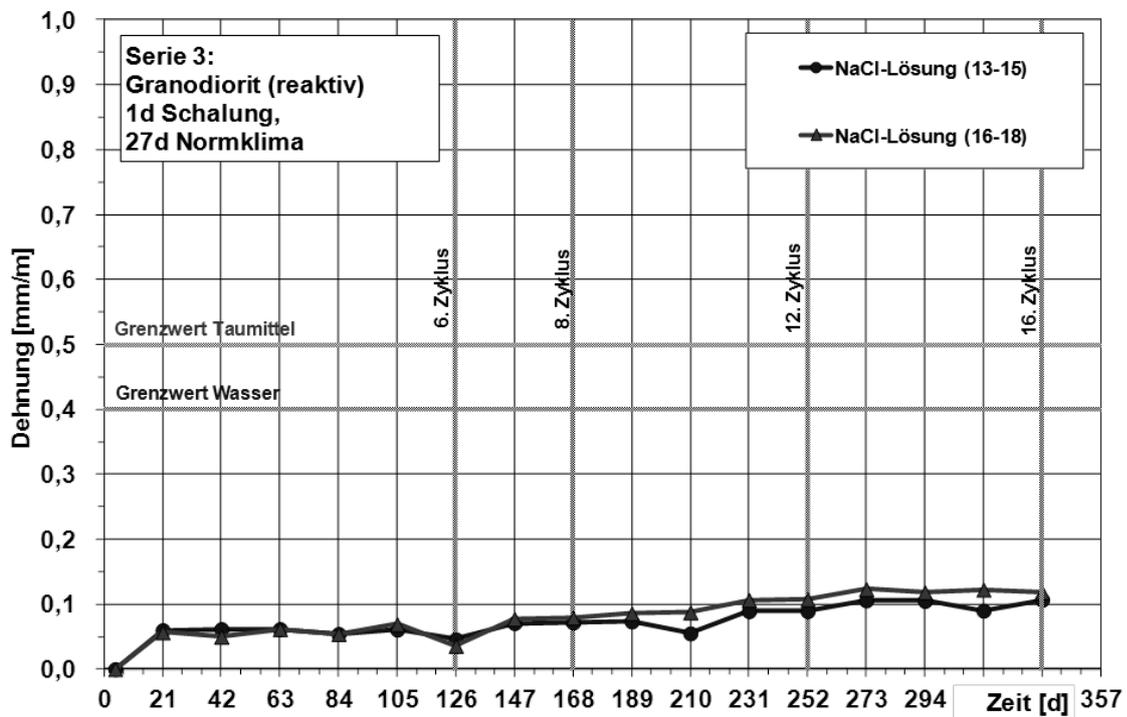


Bild 11: Dehnungsverlauf über 1 Jahr

Fig. 11: Material strain history over 1 year

## 5 Projektergebnis

Das Projektziel, einen „Hochleistungsbeton für Alle“ zu entwickeln wurde erreicht - konnte allerdings nur durch vergleichende Prüfungen nachgewiesen werden. Notwendig zur aussagekräftigen Charakterisierung von Hochleistungsbetonen ist die Entwicklung verbesserter mechanischer Prüfmethode n z.B. auch in Verbindung mit zerstörungsfreien Materialprüfungen.

Die Perspektiven in der Bauindustrie beschränken sich aufgrund fehlender Regelwerke für Hochleistungsbeton im konstruktiven Bereich auf Anwendungen bei Betonwerksteinen wie hochwertige Fassadenplatten oder bei Sonderkonstruktionen mit geklebten Elementen, die durch die hohe Oberflächenfestigkeit des UHPC erst möglich werden. Anwendungen außerhalb des Bauwesens wie Maschinenbetten und Werkzeuggestelle als Alternative zu metallischen Werkstoffen sind heute bereits umsetzbar.

## 6 Potenzielle Anwendungen für OLAF Compound 5941



Bild 12: Fassade Ferchau, Gummersbach\*

Fig. 12: Façade Ferchau, Gummersbach\*



Bild 13: Parabolreflektor\*

Fig. 13: Parabolic reflector



Bild 14: Geklebtes Fischzuchtbecken\*

Fig. 14: Glued fish farm bassin\*

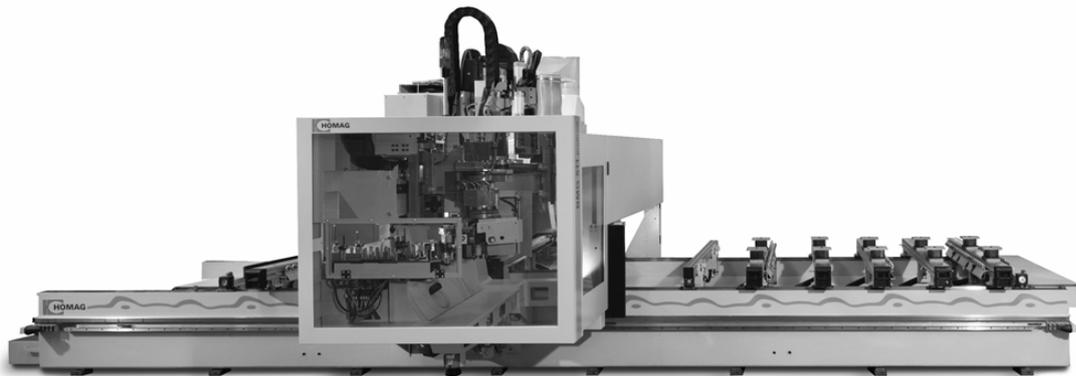


Bild 15: Maschinenbett HOMAG\*

Fig. 15: Machine bed HOMAG\*

\*ausgeführt mit Dyckerhoff Nanodur® Compound 5941

## 7 Literatur

- /1/ Deuse, T.; Hornung, D.; Möllmann, M., Von der Mikrodur- zur Nanodur Technologie, BFT International, 05/2009
- /2/ BMBF Projekt OLAf Nanotechnologisch optimierter, langlebiger, energieeffizienter und vor allem anwendungs-freundlicher Hochleistungsbeton, Förderkennzeichen 03X0066A, TIB Hannover, 2012
- /3/ Sagmeister, B.; Deuse, T., Anwendungen von UHPC auf Basis eines Spezialbindemittels in Bautechnik und Maschinenbau, BWI BetonWerk International, 01/2012
- /4/ Drössler, T., Selbstverdichtende Hochleistungsbetone (HPC und UHPC) als Architekturbetone für Fassaden und Sonderanwendungen, BWI BetonWerk International, 4/2012
- /5/ Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P., Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke, Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11
- /6/ Deuse, T.; Drössler, C.; Drössler, T.; Ritter, W., Hochleistungsbeton mit Klebeverbindung, BWI BetonWerk International, 6/2014



Projektpartner/  
Unterauftragnehmer



# Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton

UHPCROAD

Beate Altreuther, Thomas Beckenbauer  
*Müller-BBM GmbH*

Michael Schmidt, Benjamin Scheffler  
*Universität Kassel, FB 14, Institut für konstruktiven Ingenieurbau – Fachgebiet  
Werkstoffe des Bauwesens*

Sven Schäfer, Joachim Heuschild  
*Holcim (Deutschland) GmbH*

## 1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Die zunehmende Verkehrsbelastung von Fernstraßen stellt hohe Anforderungen an die Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Lärminderung von Fahrbahnbelägen.

Im Projekt sollte ein Bauverfahren für eine dünne multifunktionale Betonfahrbahndecke aus ultrahochfestem Beton mit einer Druckfestigkeit von rd. 150 N/mm<sup>2</sup> (ultra high performance concrete, UHPC) erarbeitet werden. Das Bauverfahren sollte insbesondere als Instandsetzungssystem im Whitetopping-Verfahren geeignet sein.

Das Material UHPC bietet im Vergleich zu herkömmlichem Straßenbeton wesentliche Vorteile in Bezug auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der daraus errichteten Konstruktionen. Die Dicke der Fahrbahn kann mit UHPC von z.B. 16 cm auf 15 cm verringert werden. Die sehr hohe strukturelle Festigkeit sowie die extrem dichte Mikrostruktur sorgen für den außergewöhnlich hohen Widerstand z. B. gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung, Schadstoffe wie Chloride und Alkalien sowie gegen Abrasion und Witterungseinflüsse. Dadurch sind korrosionsfreie durchgehend bewehrte Fahrbahnen mit geringer Schichtdicke möglich.

Durch seine Feinkörnigkeit eignet sich UHPC grundsätzlich zum Bau lärmindernder Betonfahrbahnen, deren Lärminderungspotential über das der aktuell vorliegenden Regelbauweisen hinausgeht. Derartige Fahrbahnen erfordern besonders feine Oberflächentexturen. Die besondere Herausforderung besteht darin, die lärmindernde Textur erstens exakt und zweitens dauerhaft abzubilden. Neben der Verbesserung der akustischen Eigenschaften soll zudem eine anforderungsgerechte Griffigkeit bei gleichzeitig möglichst ressourcensparender Herstellung erreicht werden.

Ein derartiger Hochleistungswerkstoff war im Straßenbau bislang nicht verfügbar.

## 2 Projektverbund

Das Projekt wurde von den Projektpartnern Universität Kassel FB 14: Institut für konstruktiven Ingenieurbau - FG Werkstoffe Bauwesen und Bauchemie, dem Landesbetrieb Straßenbau NRW, BASF Construction Chemicals GmbH, Holcim (Deutschland) AG, ThyssenKrupp Industrial Solutions AG, Bundesanstalt für Straßenwesen, Röchling Automotive SE & Co. KG, Otto Alte-Teigeler GmbH, EUROVIA Beton GmbH und Müller-BBM GmbH bearbeitet. Der Einbau des Demonstrators wurde von der Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG. unterstützt.

### 3 Projektdurchführung

Im Projekt wurden im Einzelnen folgende Arbeitspakete bearbeitet: /1/]:

- **Materialanpassung**  
Das Kornband des Bindemittels und die Baustoffmatrix des UHPC wurden optimiert. In Verbindung mit speziell synthetisierten Hochleistungsfließmitteln wurden einbaufertige Rezepturen entwickelt, die die Belange des Straßenbaus, der Texturierung und des Umweltschutzes gleichermaßen berücksichtigen.
- **Texturanpassung**  
Die als Ausgangspunkt in das Projekt eingebrachte lärmindernde Textur wurde an die materialspezifischen Eigenschaften des UHPC und die Anforderungen aus dem Texturierungsverfahren angepasst.
- **Texturierungsverfahren**  
Es wurde ein Texturierungsverfahren für die großtechnische Umsetzung erarbeitet. Die Entscheidung für das ausgewählte Texturierungsverfahren erfolgte unter Berücksichtigung der akustischen Anforderungen, der Reproduzierbarkeit der Textur sowie der Praktikabilität beim Einbau auf großen Flächen.
- **Misch- und Einbautechnik**  
Die Misch- und Einbautechnik wurde auf die besonderen Belange und Erfordernisse des Hochleistungsmaterials abgestimmt, um das Mischgut zum einen bei minimaler Mischzeit homogen und in hoher Qualität herzustellen und zum anderen mit einem konventionellen Betonstraßenfertiger einbauen zu können.
- **Demonstrator**  
Zum Abschluss des Projekts wurde ein 30 m langes Fahrbahnstück als Demonstrator erstellt.
- **Wirtschaftlichkeit**  
Die Wirtschaftlichkeit der Bauweise wurde anhand realer Daten untersucht.

### 4 Ergebnisse

#### 4.1 Werkstoffinnovationen

Durch Werkstoffinnovationen, insbesondere den Einsatz nanoskaliger Komponenten wie Feinsthüttensandmehl und Silikastaub sowie die Entwicklung eines speziell angepassten Fließmittels auf Polycarboxylatetherbasis konnte der UHPC sowohl an die Anforderungen des herkömmlichen Betonstraßenbaus als auch an die vorgegebene lärmindernde Textur und das Texturierungsverfahren angepasst werden. Zudem konnte der Anteil an Portlandzementklinker durch die stark hüttensandhaltige Rezeptur reduziert und somit der CO<sub>2</sub> Ausstoß bei der Herstellung des Bindemittel-Compounds verringert werden.

#### 4.2 Lärminderung

Die Lärminderung der entwickelten Bauweise kann mit  $D_{\text{StrO}} = -3 \text{ dB(A)}$  bis  $-5 \text{ dB(A)}$  angegeben werden. Dies entspricht den Werten, die mit aktuell üblichen geräuschmindernden Fahrbahnbelägen aus Asphalt erzielt werden. Durch die erhöhte Lebensdauer und die hohe Stabilität und Abriebfestigkeit des optimierten Materials ist jedoch zu erwarten, dass die geräuschmindernde Wirkung bei der UHPC Fahrbahn wesentlich dauerhafter ist.

#### 4.3 Einbauverfahren

Beim Einbau auf großen Flächen (Demonstrator) zeigte sich, dass der tragende Teil des Zweischichtsystems zielsicher mit dem Gleitschalungsfertiger eingebaut werden konnte. Die erforderliche Qualität der Oberfläche konnte mit dem hier verwendeten Verdichtungs- und Einbauverfahren noch nicht flächendeckend erreicht werden. Die lärmindernde Wirkung der

erarbeiteten Bauweise ist jedoch auch in diesem - nicht optimal hergestellten - Fall besser als bei der aktuell einzigen lärmindernden Regelbauweise für Betonstraßen, deren  $D_{\text{StrO}}$ -Wert -2 dB(A) beträgt. Bei optimaler Texturierung sind – wie in einem anderen Forschungsprojekt nachgewiesen wurde – bis zu -5 dB(A) zu erzielen.

#### 4.4 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zeigt, dass bei einer ermittelten Lebensdauer des UHPC-Fahrbahnbelags von mehr als 50 Jahren trotz der etwas höheren Herstellkosten ein Kostenvorteil von etwa 50 % gegenüber aktuellen Regelbauweisen derselben Belastungsklasse besteht. Da gleichzeitig Unterhalt und Erhaltungsaufwand verringert werden, sind durch diese Bauweise auch wesentliche volkswirtschaftliche und – wegen der Baustoffeinsparung bei der dünneren Decke – ökologische Vorteile zu erwarten /3, 4/.

### 5 Diskussion

Die Vorgaben des Projekts können mit dem hier erarbeiteten Bauverfahren bei optimaler Ausführung der Oberfläche erfüllt werden, wie sich an den Versuchen auf kleinen Flächen zeigen ließ. Der Einbau der tragenden UHPC-Betondecke war mit einem herkömmlichen Gleitschalungsfertiger problemlos möglich.

Die Anpassung des Einbau- und Texturierungsverfahrens für den feinkörnigen Oberflächenmörtel aus UHPC auf größeren Flächen muss im Wesentlichen auf Seiten der Maschinenteknik erfolgen. Die bei dem ersten Einbauversuch aufgetretenen Schwierigkeiten erscheinen jedoch überwindbar, Lösungsmöglichkeiten werden derzeit erarbeitet.

Die im Rahmen des Projektes erfolgreich entwickelte neue Bauweise aus durchgehend bewehrtem UHPC-Straßenbeton mit einer dünnen, texturierten und dadurch emissionsreduzierten Oberflächenschicht verspricht gegenüber der herkömmlichen Betonbauweise leiser, materialsparender, deutlich langlebiger und dadurch insgesamt wirtschaftlicher und ressourcenschonender zu sein. Der schnellere Einbau verkürzt insbesondere bei Instandsetzungen im Whitetopping-Verfahren die Einbauzeit und trägt damit zur Verringerung der baustellenbedingten Verkehrsbehinderungen bei [3,4].

Die Umsetzung der neuen Bauweise in die Praxis kann gefördert werden durch

- die Entwicklung und praktische Erprobung einer geeigneten Maschinenteknik für den großflächigen Einbau und die Texturierung der feinkörnigen UHPC-Oberflächenschicht z.B. in einem Folgeprojekt,
- den Bau weiterer Erprobungsstrecken auf Bundes- und Landesstraßen,
- die Entwicklung eines UHPC-spezifischen straßenbautechnischen Regelwerks als Vertragsgrundlage.

### 6 Literatur

- /1/ Verbundvorhaben „Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton - UHPC“. Schlussberichte Förder-Kennzeichen 13N 10492 bis 13N 10500; <http://www.tib.uni-hannover.de/>
- /2/ Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90: Ausgabe 1990. Der Bundesminister für Verkehr. Bonn, den 22. Mai 1990. Berichtigter Nachdruck Februar 1992.
- /3/ Schmidt, C.: Konstruktion und Wirtschaftlichkeit von Whitetopping aus Hochleistungsbeton für Fahrbahnen. Dissertation Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 20 (2012).
- /4/ Schmidt, C., Schmidt, M.: Konstruktion und Wirtschaftlichkeit von Whitetopping mit dünnen Schichten aus Hochleistungsbeton“, Straße und Autobahn Heft 5/2013, S. 313 – 320, Kirschbaum Verlag.

# Kalt härtende Keramik durch nanotechnologische Gefügeoptimierung

KALT HÄRTENDE KERAMIK

Prof. Dr. Dietmar Stephan

*Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie, Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin*

## 1 Projektbeschreibung

Im Mittelpunkt des Projektes stand die Formulierung einer mit mineralischen Bindemitteln hergestellten, nanotechnologisch optimierten „kalt härtenden Keramik“. Darunter sind ungebrannte, d.h. bei Temperaturen  $< 100^{\circ}\text{C}$  erhärtende, chemisch hoch widerstandsfähige und besonders abrasionsbeständige Betonwaren, Betonbauteile und Beschichtungsmörtel mit keramischen Eigenschaften zu verstehen. Die Anwendungsbereiche der neuartigen kalt härtenden Keramik liegen in der Führung besonders aggressiver Abwässer, in der Tierhaltung, bei Biogasanlagen und anderen Anwendungen mit sehr starkem chemischem und/oder mechanischem Angriff, d. h. Anwendungsfälle, bei denen Beton nach DIN EN 206 heute gar nicht oder nur mit zusätzlichen teuren Schutzmaßnahmen verwendet werden kann.

Ein besonderer Fokus des Vorhabens war die Formulierung hoch widerstandsfähiger nanotechnologisch optimierter mineralischer Feinmörtel für den Oberflächenschutz von Betonwaren und Bauwerken aus Normalbeton. Das Projekt ging dabei von den bei Ultra-Hochfesten Betonen (UHPC) gesammelten Erkenntnissen über die Wirkung kornoptimierter Feinstpartikel auf die Gefügedichtigkeit, die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit aus. Als Bindemittel kamen neben den konventionellen Zementen, die durch eine abgestimmte Korngrößenverteilung und den Einsatz puzzolanischer und latent hydraulischer Zusatzstoffe weiter optimiert wurden, auch alkalisch aktivierte Hüttensande zum Einsatz. Durch einen geringeren Gehalt an Calcium ist die Säurebeständigkeit erheblich verbessert, das nicht vorhandene Aluminat macht das Bindemittel unempfindlicher gegenüber dem häufig auftretenden Angriff durch Sulfate. Ein entscheidendes Element zum Erreichen der Ziele war auch der gezielte Einsatz von Nanopartikeln sowie darauf und auf die neuen Bindemittel abgestimmter, neuartiger Fließmittel. Zusammen bildeten diese Materialien die notwendige stoffliche Basis zur Optimierung der Packungsdichte und chemischen Beständigkeit des Betons oder der Mörtel bis in den Nanometerbereich. Im Projekt wurde die gesamte Wertschöpfungskette der entwickelten kalt härtenden Keramik von den Herstellern der einzelnen Rohstoffe (BASF, Woellner, FEhS – Institut für Baustoffforschung, Verein Deutscher Zementwerke, CWK Bad Köstritz), über die Formulierer und Hersteller von Bauprodukten (Remmers Baustofftechnologie, Betonwerke Neu Ulm) bis hin zu den Anwendern durch die beteiligten Industriepartner abgebildet.

# Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen durch Verringerung der Carbonatisierungsempfindlichkeit

NANOCARBO

Dr.-Ing. Christoph Müller, Dipl.-Ing. Katrin Severins  
*VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie*

## 1 Kurzfassung

Hochofenzemente (CEM III) bieten durch die Verringerung des Klinkeranteils eine Möglichkeit, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung zu begrenzen. Im Vergleich zu Portlandzementen weisen sie eine langsamere Hydratation, eine geringere Frühfestigkeit und eine stärkere Carbonatisierungsneigung in Laborprüfungen auf. Ziel war es, durch den gezielten Einsatz unterschiedlicher Additive die Hydratation von CEM III zu beeinflussen und somit in den Gefügebau von Zementstein, Mörtel und Beton einzugreifen. Durch die Herstellung von CEM III in einem Zementwerk wurde die verfahrenstechnische Realisierung geprüft. Zur Anwendung kamen übliche Prüfmethode. Verschiedene Additive zeigten, in Abhängigkeit von der Zementzusammensetzung, unterschiedliche Effekte auf das Carbonatisierungsverhalten. Eine gewisse Verringerung der Carbonatisierungsempfindlichkeit von CEM III-Betonen wurde, in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil der verwendeten Ausgangsstoffe sowie der Prüfbedingungen (z. B. Dauer der Vorlagerung), beobachtet. Außerdem können Herstellungsverfahren und Granulometrie von Hochofenzementen den Carbonatisierungswiderstand in gewissem Umfang beeinflussen. Das Forschungsziel wurde erreicht.

## 2 Einleitung

Ziel Forschungsvorhabens war es, durch den gezielten Einsatz von Zementnebenbestandteilen/Additiven, z. B. in Form von reaktiven Aluminiumverbindungen, die Hydratation hüttensandhaltiger Zemente zu beeinflussen und somit in den Gefügebau von Zementstein, Mörtel und Beton bis in den Nanobereich einzugreifen. Diese Einflussnahme zielte darauf ab, verschiedene reaktive Additive „von außen“ zuzuführen und dem hydratisierenden Zement somit beispielsweise die Bildung einer ausreichenden Menge von Alumosilicaten zu ermöglichen, die die Bildung von Silicathydrogelen vermindern und somit einen Beitrag für ein stabileres und dichteres Gefüge leisten sollten. In diesem Forschungsvorhaben kam es darauf an, die Auswirkungen des Einsatzes der o. g. Additive auf das Betongefüge sowie auf festigkeits- und dauerhaftkeitsrelevante Eigenschaften, wie insbesondere das Carbonatisierungsverhalten des Betons, zu erfassen. Es sollten außerdem die Ursachen und Randbedingungen für das Carbonatisierungsverhalten von Hochofenzementbetonen sowie die Carbonatisierungsvorgänge im Zementsteingefüge weiter erforscht werden. Dabei sollten neben den Auswirkungen der chemisch mineralogischen Hüttensandeigenschaften auch granulometrische Einflüsse der Zemente und deren Hauptbestandteile auf das Gefüge betrachtet werden, um ein insgesamt optimiertes Betongefüge zu erzielen.

## 3 Untersuchungen

Aufbauend auf vorgeschalteten Grundlagenversuchen zur Leistungsfähigkeit der Hochofenzemente wurden Untersuchungen zum Carbonatisierungsverhalten von Hochofenzementbetonen durchgeführt. Die dabei verwendeten CEM III/A- und CEM III/B-Zemente wurden labortechnisch mit einem Klinker-Hüttensand-Massenverhältnis von 50 : 50 bzw. 20 : 80 hergestellt. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Additive zu testen, wurden Zemente ohne Additiv sowie mit 5 M.-% Additiv durch getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen erzeugt. Als Additive kamen Aluminat (A) und Kalkstein (N) zum Einsatz, in Tastversuchen wurde auch Calciumhydroxid (C) verwendet. Der

überwiegende Teil der Versuche wurde unter Verwendung eines Portlandzementklinkers mit unterschiedlichen Mahlfeinheiten (C4, C5) durchgeführt. Die Hüttensande SI und SII wiesen unterschiedliche Zusammensetzungen auf, wobei bei Hüttensand SI aufgrund seines höheren Aluminiumoxidgehalts eine höhere Leistungsfähigkeit erwartet wurde als bei Hüttensand SII.

Mit den Hochofenzementen wurden Betone hergestellt und geprüft. Die Mischungszusammensetzung orientierte sich an den Grenzwerten für die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Betonen nach DIN Fachbericht 100 „Beton“. Dies ergab eine Betonzusammensetzung mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,65$  und einem Zementgehalt  $z = 260 \text{ kg/m}^3$ . Für die Herstellung der Betone wurden Gesteinskörnungen (Rheinsand und Rheinkies aus den Beständen des Forschungsinstituts der Zementindustrie) mit der Kornzusammensetzung A16/B16 nach DIN 1045-2, Anhang L verwendet. Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgte an Betonbalken mit den Abmessungen  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ . Die Probekörper für die 7-Tage-Vorlagerung wurden 1 Tag in der Feuchtkammer, 6 Tage unter Wasser bei  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (Vorlagerung) und anschließend bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  und einer relativen Feuchte von  $(65 \pm 5) \%$  (Hauptlagerung) gelagert. Die Probekörper für die 28-Tage-Vorlagerung wurden 1 Tag in der Feuchtkammer, dann 27 Tage unter Wasser bei  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (Vorlagerung) und anschließend bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  und einer relativen Feuchte von  $(65 \pm 5) \%$  (Hauptlagerung) gelagert. Die Carbonatisierungstiefen wurden i. d. R. im Betonalter von 42, 91, 180 und 364 Tagen ermittelt.

#### 4 Beispielhafte Ergebnisse

Untersucht wurden unter anderem CEM III/A-Betone, die auf Basis von Zementen mit Hüttensand SI bzw. SII hergestellt wurden. Die Bilder 1 und 2 zeigen den zeitlichen Verlauf der Carbonatisierungstiefe der Betone.

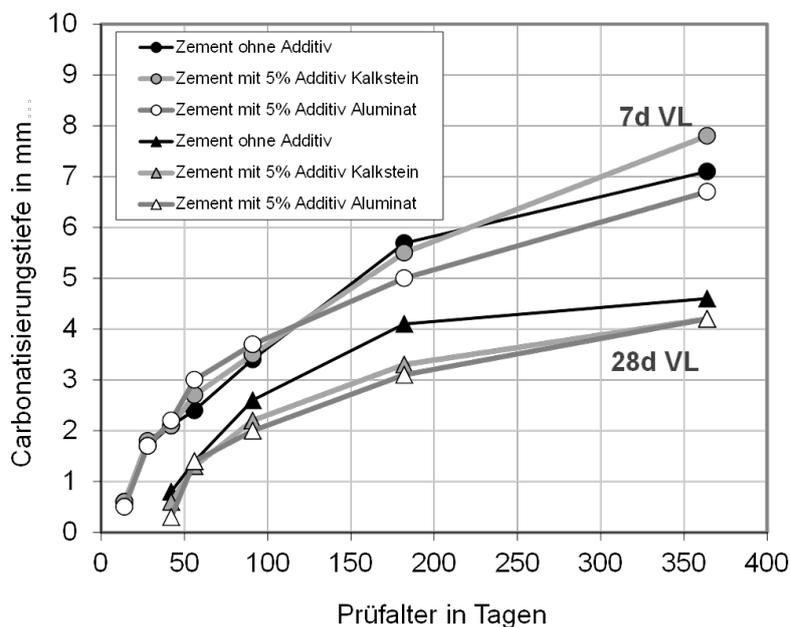


Bild 1: Carbonatisierung von CEM III/A-Betonen ( $z = 260 \text{ kg/m}^3, w/z = 0,65$ ) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen – Verwendung von Hüttensand SI 40 ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) und der gröberen Klinkerkomponente C4 ( $3050 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) im Zement

Fig. 1: Carbonation of CEM III/A concretes ( $c = 260 \text{ kg/m}^3, w/c = 0.65$ ) for preliminary storage of 7 and 28 days using blastfurnace slag SI 40 ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) and coarse clinker C4 ( $3050 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) in the cement

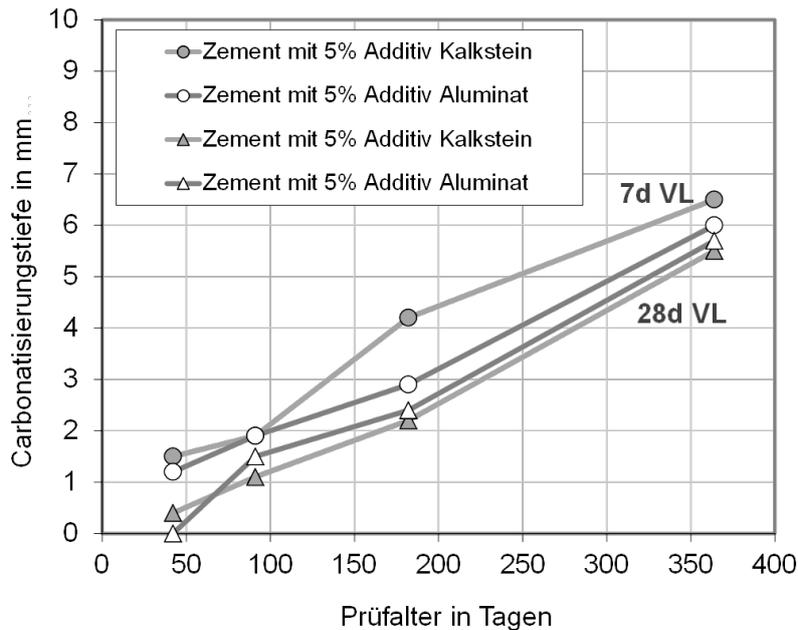


Bild 2: Carbonatisierung von CEM III/A-Betonen ( $\rho = 260 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,65$ ) bei einer Vorlagerung von 7 bzw. 28 Tagen, Verwendung von Hüttensand SII 40 ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) und der feineren Klinkerkomponente C5 ( $5510 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) im Zement

Fig. 2: Carbonation of CEM III/A concretes ( $\rho = 260 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0.65$ ) for a preliminary storage of 7 and 28 days using blastfurnace slag SII 40 ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) and fine clinker C5 ( $5510 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) in the cement

Bei einem Prüfalter von 364 Tagen wurden an den Betonen, deren Vorlagerung 28 Tage betrug, keine signifikant unterschiedlichen Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Art der eingesetzten Additive ermittelt. Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SI wurden gewisse Unterschiede in der Carbonatisierungstiefe ermittelt, wenn die Betone 7 Tage vorgelagert wurden. So wurde bei Einsatz des Additivs A im Vergleich zur Verwendung des Additivs N eine um ca. 1 mm geringere Carbonatisierungstiefe im Alter von 364 Tagen bestimmt. Die Druckfestigkeiten dieser Betone lagen zwischen 37 und 40 N/mm<sup>2</sup>. Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SII wurden keine wesentlichen Unterschiede in der Carbonatisierungstiefe ermittelt. Die Druckfestigkeiten dieser Betone lagen zwischen 37 und 39 N/mm<sup>2</sup>.

Einen deutlich größeren Einfluss auf das Prüfergebnis nach 364 Tagen hatte die Dauer der Vorlagerung. Bei Anwendung der Zemente mit Hüttensand SI wurden im Alter von 364 Tagen Differenzen von bis zu 3 mm in Abhängigkeit von der Vorlagerungsdauer ermittelt. Wurde hingegen der Hüttensand SII verwendet, reduzierten sich die Differenzen der Carbonatisierungstiefen auf etwa 1 mm. Darüber hinaus hatte die Kombination des verwendeten Hüttensands mit entsprechender Feinheit der Klinkerkomponente gewisse Auswirkungen auf das Niveau der Carbonatisierungstiefe nach 364 Tagen. Bei einer Vorlagerung von 28 Tagen erzielten die Betone auf Basis des Hüttensands SI (kombiniert mit der gröberen Klinkerkomponente C4) geringere Carbonatisierungstiefen als bei Verwendung von Hüttensand SII (kombiniert mit feinerem Klinker C5).

Weitere Ergebnisse sind /1/ zu entnehmen.

## **5 Schlussfolgerungen**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die beobachteten Effekte insgesamt hinter den Erwartungen zurückblieben. Die Untersuchungen des Carbonatisierungswiderstands der Mörtel und Betone unter Verwendung optimierter Hochofenzemente mit 50, 65 bzw. 80 M.-% Hüttensand zeigten zwar zum Teil positive Effekte. Die Ergebnisse sind aber nicht grundsätzlich auf alle Zementzusammensetzungen bzw. Klinker-Hüttensand-Kombinationen übertragbar. Verschiedene Additive zeigten – ebenfalls in Abhängigkeit von der Zementzusammensetzung – unterschiedliche Effekte auf das Carbonatisierungsverhalten. Eine gewisse Verringerung der Carbonatisierungsempfindlichkeit von Hochofenzementbetonen wurde – in Abhängigkeit von der Art und dem Anteil der verwendeten Ausgangsstoffe sowie der Prüfbedingungen (z. B. Dauer der Vorlagerung) – beobachtet. Die rechnerische Auswirkung der beobachteten maximalen Differenzen in den Carbonisierungstiefen auf die Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex eines Stahlbetonbauteils in einer Lebensdauerberechnung mit einer üblichen Betondeckung ist zu überprüfen. Die Auswirkung auf das Praxisverhalten von Betonbauteilen wird als gering eingeschätzt.

## **6 Literatur**

- /1/ VDZ Tätigkeitsbericht 2009-2011: Kap.3 - Einfluss von Additiven auf die Druckfestigkeit und Carbonatisierungsneigung von Hochofenzementen; Kap. 5 - Carbonatisierung von Hochofenzementbetonen

# **Nanoskalige Aktivierung von Hüttensand und Portlandzement mittels eines innovativen Mahlverfahrens zur Erzeugung von Hochleistungs- und Ultrahochleistungsbeton mit verbesserten Eigenschaften**

FUTURZEMENT

Henning Zoz, Birgit Funk, Deniz Yigit  
*Zoz GmbH*

## **1 Einleitung und Problemstellung**

Die Verwendung von Hüttensand (GGBS) für Bindebaustoffe ist wirtschaftlich und ökologisch hoch effizient. Hüttensandhaltige Zemente lassen sich nach dem Stand der Technik gegenüber Portlandzement mit erheblich geringeren Kosten und Energieaufwand und geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugen.

Hüttensandhaltige Zemente haben durch den Hüttensandzusatz gegenüber Portlandzement zusätzlich eine Reihe von positiven Eigenschaften für die Dauerhaftigkeit, z.B. niedrigere Hydratationswärme, niedrigerer wirksamer Alkaligehalt, hoher Sulfatwiderstand, hoher Widerstand gegen Chloriddiffusion und hoher Widerstand gegen chemische Angriffe und Meerwasser. Außerdem ist Hüttensand ein industrielles Nebenprodukt, welches bei Nichtnutzung entsorgt werden müsste. Nachteilig ist, dass der Hüttensand im Bindemittelsystem im Allgemeinen langsamer reagiert als Portlandzementklinker. Damit verbunden wird die Hydratation mit steigendem Hüttensandanteil deutlich verlangsamt und dadurch auch die Anfangsfestigkeit vermindert.

Hüttensand, der durch Granulation und Mahlung von Hochofenschlacke entsteht, ist ein latent hydraulischer Stoff, dessen eigenes Erhärtungsvermögen für die industrielle Nutzung nicht ausreicht. Bisher wurde der Hüttensand als Klinkersubstitut zur Herstellung von hüttensandhaltigen Zementen eingesetzt. Um Hüttensand effizienter als Zusatz einsetzen zu können, wird eine Aktivierung benötigt.

## **2 Ziele**

Das Ziel des Projektes ist, durch Anwendung der hochkinetischen Prozesstechnik (HKP) den Hüttensand einerseits auf eine Teilchengröße weit unter einem Mikrometer zu zerkleinern und gleichzeitig eine nanoskalige Aktivierung durch intensive Gefügestörung zu erreichen. Damit wurde eine deutlich höhere Reaktivität erzielt. Welche Einflüsse die nanoskalige Aktivierung auf das Mikro- und Nanogefüge hat, war Gegenstand der Untersuchungen.

Außerdem wurden im die erwarteten positiven Veränderungen der Eigenschaften von Hochleistungsbeton (HPC) durch Einsatz von mittels HKP aktivierten Hüttensand und Klinker vom Labormaßstab bis zur industriellen Praxis, wie Verarbeitbarkeit, mechanische Eigenschaften, Dauerhaftigkeit und den Widerstand gegen chemische Angriffe detailliert charakterisiert, und damit Modellvorstellungen für die Wirkmechanismen entwickelt.

## **3 Ergebnisse**

Die Mahlungen mit verschiedenen Arten von Hüttensand und Klinker, die als Ausgangsmaterialien für die Zementzubereitung verwendet werden, wurden mit der Hochenergiekugelmühle durchgeführt. Die Parameter wurden im Labormaßstab optimiert.

Die hochaufgemahlene GGBS erzielen eine deutlich höhere Reaktivität gegenüber dem Referenzmaterial. Aus den Versuchen ließen sich eine deutliche Erhöhung der Reaktivität und eine nanoskalige Aktivierung ableiten. Die Ergebnisse zeigen, dass die HKP ein sehr effektiver Prozess für

die Zerkleinerung von Hüttensanden und Klinker ist, obwohl die HKP-Prozessdauer für die Aktivierung nur wenige Minuten beträgt und eine deutlich gesteigerte Reaktivität bewirkt.

Es wurden ein Zement -„FuturZement“- und daraus ein Beton -„FuturBeton“- entwickelt, der sich durch besonders hohe Frühfestigkeiten und eine verbesserte Dauerhaftigkeit auszeichnet.

#### 4 Demonstrator

Bereits realisiert wurde 2012 eine Brücke als Demonstrator in Kooperation mit der Kreisstadt Olpe und Strassen.NRW (Bild 1) /1/. Hierbei ist klarzustellen, dass die Bauteildicke nicht die Möglichkeiten des Werkstoffs sondern gegebene Richtlinien widerspiegelt, weswegen die Ausführung geometrisch so zu erfolgen hatte, wie bei konventionellem Beton herkömmlicher Festigkeit.

Am 21.06.2013 wurde am Zoz-Standort in Siegen die Montage eines 6x6 m<sup>2</sup> großen und ca. 12 t schweren Ziergiebels aus FuturBeton an der Fassade der "Villa Marie" (Bild 2) unmittelbar an der Hauptverkehrsstraße im Zentrum der Kreisstadt durchgeführt. Dazu wurden bei Zoz 950 kg HKP-GGBS abermals quasi unter Laborbedingungen produziert, die bei Dyckerhoff zu ca. 3 t FuturZement weiterverarbeitet wurden. Der daraus hergestellte FuturBeton formte dann den Ziergiebel, der weithin sichtbar beste Publikumswirkung verspricht (Bild 2). Insofern handelt es sich hierbei um den zweiten Demonstrator der jetzt allerdings in Eigenregie (Zoz und Dyckerhoff) her- und aufgestellt wurde.



Bild 1: Montage der Brücke Rosenthal am 14.11.2012 in Olpe

Fig. 1: Installation of „Bridge Rosenthal“ on 14/11/2012 in Olpe



Bild 2: Montage des Ziergiebels „Villa Marie“ am 21.06.2013 in Siegen

Fig. 2: Installation of the balustrade of "Villa Marie" on 21/06/2013

## Literatur

- /1/ BMBF Forschungsprojekt "FuturZement", Projekt-Nr. 03X0068A (2009-2012)
- /2/ H. Zoz, H. U. Benz, G. Schäfer, M. Dannehl, J. Krüll, F. Kaup, H. Ren, and D. Jaramillo V.: High Kinetic Processing of Enamel, p. I-a/b, INTERCERAM International Ceramic Review, Vol. 50 (2001) pp 388-395 & [6] pp 470-477
- /3/ H. Zoz, D. Jaramillo V., Z. Tian, B. Trindade, H. Ren, O. Chimal-V. and S. Diaz de la Torre: High Performance Cements and Advanced Ordinary Portland Cement Manufacturing by HEM-Refinement and Activation, ZKG International vol. 57 (2004) no.1, pp. 60-70
- /4/ W. Nolte, Dyckerhoff AG: High Performance Cement and application, OZ-10, 3rd German-Japanese Symposium on Nanostructures (2010), Wenden, Germany, proceedings vol. 3 p-no. V05
- /5/ J. C. Arteaga-Arcos, O. A. Chimal-Valencia, D. J. Delgado Hernández H. T. Yee-Madeira and S. Diaz de la Torre: High Energy Ball Mill Parameters used to obtain Ultra-Fine Portland Cement at laboratory level, ACI Materials Journal, 108-M39, pp. 371-377 [July/August 2011]
- /6/ Ma. T. Fuentes-Romero, Doctor thesis, 2013. CIITEC-IPN, Mexico
- /7/ The Cement Sustainability Initiative Progress Report [2005]

# Nanotechnologisch funktionalisierte Baustoffe zur solarkatalytischen Luft- und Oberflächenreinigung

HELIOCLEAN

Dr. Thomas Koch, Dr. Horst Purwin, Kai Amrhein, Dr. Lothar Elfenthal  
*KRONOS INT. INC.*

## 1 Kurzüberblick

Das vom BMBF geförderte Forschungsvorhaben beschäftigt sich während seiner dreijährigen Laufzeit mit der photokatalytischen Zersetzung von Luftschadstoffen unter Nutzung von Sonnenlicht mittels nanotechnologisch funktionalisierter Baustoffoberflächen. Darüber hinaus führt die Funktionalisierung zu einem Selbstreinigungseffekt und verhindert die Bildung von Biofilmen und die damit einhergehende Biokorrosion von Baustoffen.

## 2 Luftverschmutzung und Photokatalyse

Stickoxide wie NO und NO<sub>2</sub> aus Verbrennungsmotoren sind weit verbreitete Luftschadstoffe, die neben weiteren gesundheitsgefährdenden Verbindungen besonders in Städten und verkehrsreichen Gebieten in hohen Konzentrationen auftreten. Die seit 2010 gültigen Jahresmittel-Grenzwerte für das gesundheitsschädliche Stickstoffdioxid werden in der Hälfte aller verkehrsnahen Messstationen deutscher Städte überschritten und beeinflussen so unser aller Wohlbefinden [1]. Kurz- und mittelfristig ist es nicht möglich, alle anthropogenen Quellen für Luftverschmutzungen abzustellen. Deshalb müssen Möglichkeiten in Betracht gezogen werden, speziell in stark belasteten Regionen wie urbanen Ballungszentren, in der Atmosphäre befindlichen Schadstoffe zu verringern.

Um einen solchen Minderungsprozess verwirklichen zu können, müssen die aufzuwendenden Material- und Energiekosten gering sein und große Flächen entsprechend funktionalisiert werden. Eine Möglichkeit die hohen Konzentrationen an Luftschadstoffen zu verringern, stellen photokatalytisch aktive Oberflächen dar. Hierfür bieten sich insbesondere Baustoffoberflächen an, die in besonders belasteten Gebieten ausreichend zur Verfügung stehen. Dazu gehören neben Dachziegeln und Betonpflastersteinen auch Sichtbetonoberflächen und Fassaden, die durch eine Oberflächen-Funktionalisierung dazu beitragen können, die Belastung an Luftschadstoffen zu verringern. Die Photokatalyse ist die Beschleunigung einer chemischen Reaktion durch die Einwirkung von Lichtenergie auf einen beteiligten Photokatalysator. Der Photokatalysator absorbiert die Energie der einfallenden UV-Strahlung der Sonne und erzeugt freie Ladungsträger (Elektronen und „Löcher“), die für chemische Reaktionen zur Verfügung stehen. Diese bilden mit Luftsauerstoff und der natürlichen Luftfeuchtigkeit Radikale, die anschließend Schadstoffe in unschädliche Stoffe abbauen können. Schematisch ist dies in Abb. 1 dargestellt. (siehe Bild 1).

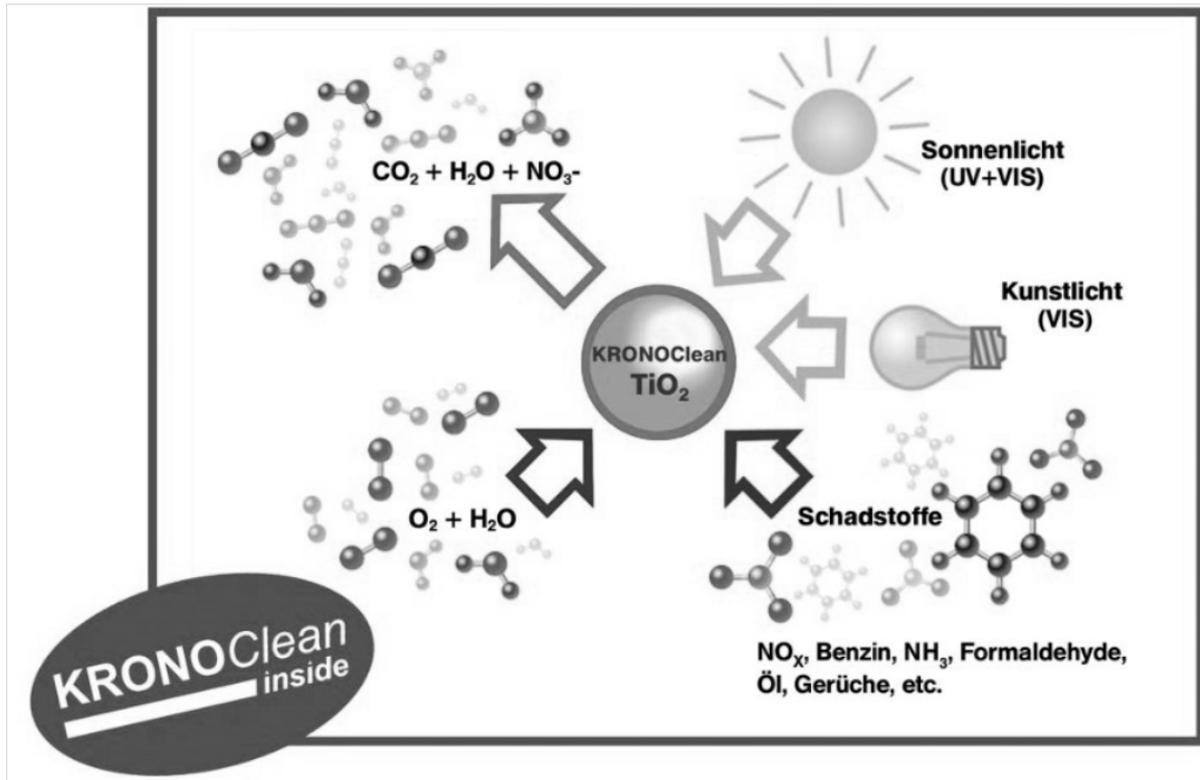


Bild 1: Grafische Darstellung des Schadstoffabbaus mit Photokatalyse

### 3 Erreichte Projektziele und Projektpartner

Ziel des Vorhabens ist es, durch die enge Vernetzung universitärer und industrieller Forschung Demonstratoren in Form von Baustoffen und bauchemischen Produkten zu entwickeln, die mit Hilfe nanoskaliger Titandioxide ( $\text{TiO}_2$ ), darauf basierender Core-Shell-Partikel und Photosensibilisatoren optimiert werden. Die Leistungsfähigkeit der Baustoffe in Bezug auf den photokatalytischen Schadstoffabbau soll bei geringeren Herstellkosten deutlich über die bestehender Produkte hinausgehen und eine größere Verbreitung ermöglichen, was sich durch die gesteigerte Effizienz positiv auf den Abbau von Luftschadstoffen auswirken soll. Darüber hinaus soll die Funktionalisierung zu einem Selbstreinigungseffekt führen und die Bildung von Biofilmen und die damit verbundene Biokorrosion von Baustoffen verhindern. Im Projekt HelioClean wird durch die Vernetzung der Verbundpartner die gesamte Wertschöpfungskette photokatalytisch aktiver und selbstreinigender Baustoffoberflächen von der Rohstoffherstellung bis zur Endanwendung und Analytik abgebildet. Die beteiligten Projektpartner sind in die folgenden drei Arbeitsgruppen untergliedert:



Bild 2: Grafische Darstellung der Zusammensetzung der Arbeitsgruppen des Projekts

Als erstes Projektziel wurde die Steigerung der Effizienz der Photokatalysatoren, auch in lichtschwachen Bereichen verfolgt. Dazu wurden zwei verschiedene Wege gewählt, um zusätzlich zum UV-Anteil sichtbares Licht zu nutzen:

- Dotierung der Photokatalysatoren

Das Institut für Technische Chemie (LU Hannover) dotiert ZnO<sub>2</sub>-Photokatalysatoren mit verschiedenen Übergangsmetallen und konnte so sowohl die Selektivität der NO-Oxidation als auch die Nutzung von sichtbarem Licht ermöglichen. KRONOS verfolgte einen ähnlichen Weg für TiO<sub>2</sub>-Photokatalysatoren und erreichte durch eine Eisendotierung eine erfolgreiche Verschiebung der Bandkante in den sichtbaren Bereich des Lichtspektrums und eine gute Aktivität beim NO-Abbau. IBU-tec stellte sowohl dotiertes ZnO<sub>2</sub> als auch TiO<sub>2</sub> her, das von der Arbeitsgruppe Prüfverfahren untersucht wurde.

- Modifizierung des TiO<sub>2</sub> mit Photosensibilisatoren

In der Chemie mesoskopischer Systeme (Universität Kassel) wurden Phthalocyanine, die Ähnlichkeit mit dem grünen Blattfarbstoff Chlorophyll aufweisen, hergestellt und an die Oberfläche von TiO<sub>2</sub>-Photokatalysatoren angebunden. Diese grünen TiO<sub>2</sub>-Farbstoff-Hybride ermöglichen über die Bildung von reaktivem Singulett-Sauerstoff den Schadstoffabbau unter Bestrahlung mit blauem und sogar rotem Licht.

Das zweite Ziel stellt die Vergrößerung der effektiven Oberfläche des Photokatalysators in der Baustoffmatrix dar. Auf diese Weise soll die Einsparung von kostenintensivem Photokatalysator und dessen effiziente Nutzung ermöglicht werden. Dies wird durch folgende Ansätze realisiert:

- Herstellung von Core-Shell-Partikeln

Im FG Bauchemie (Universität Kassel) werden inerte Silikakugeln und im weiteren Projektverlauf Sandkörner mit photokatalytisch aktivem Titandioxid beschichtet, da dieses nur an der Oberfläche wirkt und im Inneren kostengünstige Alternativen eingesetzt werden können.

- Dispergierung in der Baustoffschicht

Die verbesserte Dispergierung in der Baustoffmatrix wurde sowohl bei der Anwendung von Fassadenfarben als auch bei Betonbaustoffen untersucht und optimiert. So wurden Photokatalysatordispersionen und Trennmittel für die Betonherstellung erforscht, die eine gute Verteilung des Titandioxids an der Oberfläche ermöglichen.

- Transparente photokatalytische Schicht

Über den Einsatz von transparenten Photokatalysator-Dispersionen ist es möglich transparente Schichten mit gesteigerter photokatalytischer Effizienz auf Tondachziegeln aufzubringen, die erfolgreich die Bildung von Biofilmen erschweren. (siehe Bild 3)



Bild 3: Tondachziegel von Erlus auf einem Bewitterungsstand mit transparenter  $\text{TiO}_2$  Schicht (links) und Biofilm (rechts).

#### **4 Modelle und Demonstratoren**

Zum Abschluss des Projekts wurde erfolgreich ein Funktionsmodell mit aktiven und konventionellen Baustoffen hergestellt, das zusammen mit einer Lichtquelle, einem Messturm und dem entsprechenden Messeaufbau den Effekt der Photokatalyse auf Schadstoffe live darstellen kann. Diese werden in das Modell eingeleitet und die Messkurve zeigt live die Schadstoffminderung.

Aus den erforschten und optimierten Baustoffen mit funktionalisierten Oberflächen wurde neben einem Funktionsmodell auch ein Großdemonstrator in Form einer Wand mit sieben Metern Länge und zwei Metern Höhe hergestellt. Diese besteht aus unterschiedlichen Betonsegmenten mit photokatalytischen Dachziegeln und steht auf einer ebenfalls aktiven Pflastersteinfläche in Wiesbaden vor dem Wilhelm Dyckerhoff Institut.

#### **5 Zusammenfassung**

Die anvisierten Ziele des Vorhabens wurden erfolgreich umgesetzt. Sowohl über den Ansatz der Dotierung der Photokatalysatoren als auch über die Oberflächenmodifizierung mit speziellen Farbstoffen kann das nutzbare Spektrum vom UV-Bereich bis in den sichtbaren Bereich des Lichts erweitert werden. Die Erhöhung der effektiven Oberfläche war ebenfalls erfolgreich (Core-Shell, transparente Schichten etc.). Zum Projektabschluss wurden funktionsfähige Demonstratoren und ein Funktionsmodell für Messevorführungen erfolgreich getestet und der Öffentlichkeit vorgestellt. Offen bleibt jedoch das tiefere Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Probenmatrix und Photokatalysator, dass in dem Nachfolgeprojekt PureBau erforscht werden soll.

#### **6 Literatur**

- /1/ Luftqualität 2012, Broschüre, Umweltbundesamt 2013
- /2/ A. Winzenburg, R. Faust, "Efficient Photocatalysis in the Visible with  $\text{TiO}_2$ /Phthalocyanine Hybrid Particles." 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 2012.

# Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen

TiO<sub>2</sub>TRC

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber, Dipl.-Ing. Christian Neunzig  
*RWTH Aachen University – Institut für Bauforschung*

## 1 Aufgabenstellung

Im Verbundforschungsvorhaben „TiO<sub>2</sub>TRC - Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen“ kooperierten die fünf Verbundpartner aus Tabelle 1, wobei das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University (ibac) der Vorhabenkoordinator war.

Tabelle 1: Beteiligte Partner

Table 1: Project Participants

| Verbundpartner                                      | Assoziierte Partner                          | Unterauftragnehmer    |
|---|--|-----------------------|
| 1   | 2  | 3                     |
| Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ)        | Dyckerhoff AG                                | PE INTERNATIONAL GmbH |
| DuraPact Gesellschaft für Faserbetontechnologie mbH | Sachtleben Pigment GmbH                      |                       |
| LKT GmbH  | Benno Drössler GmbH & Co. Bauunternehmung KG |                       |
| Bostik GmbH   | SAERTEX GmbH & Co. KG                        |                       |

Drei Teilbereiche wurden im Rahmen des Projektes bearbeitet:

- Schadstoffersetzung,
- Selbstreinigung und
- Klebeignung von titandioxidmodifiziertem Textilbeton.

Bei Textilbeton handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, bei dem die übliche Stahlbewehrung durch technische Textilien ersetzt wird. Durch die Verwendung von Nanopartikeln aus Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) werden für diesen Baustoff neue Anwendungsgebiete und zusätzliche Funktionalitäten wie Selbstreinigung und Schadstoffersetzung erschlossen.

Titandioxid wird in vielfältigen Bereichen eingesetzt, z. B. in Beschichtungen und Farben, um eine selbstreinigende Oberfläche zu erzielen. Die Selbstreinigung durch Titandioxid beruht auf der Superhydrophilie, die durch Bestrahlung mit Licht hervorgerufen wird. Die Verschmutzung wird bei Regen vom Wasser unterwandert und abgespült. Gleichzeitig erfolgt unter Lichteinwirkung ein Abbau von Schadstoffen (z. B. NO<sub>x</sub>). Titandioxid wird bereits seit längerem als Weiß-Pigment in Beton eingesetzt und ist im alkalischen Milieu stabil. Daher bietet es sich an, auf eine Beschichtung zu verzichten und das Titandioxid direkt in den Beton einzumischen. Beim Einsatz in Normalbeton erhöhen sich jedoch die Kosten erheblich, da größere Mengen des relativ teuren Titandioxids gebraucht werden. Zudem ist Titandioxid nur an der Oberfläche wirksam, weshalb eine Verteilung über den gesamten Bauteilquerschnitt unwirtschaftlich ist. Textilbetonbauteile können dagegen mit sehr geringen Dicken hergestellt werden, da die Betondeckung zum Korrosionsschutz der Bewehrung

minimiert werden kann. Werden die Bauteile im Laminierverfahren hergestellt, so ist es zudem möglich, nur die äußerste Schicht (ca. 3 mm) mit Titandioxid zu versetzen. In diesem Fall wären die Mehrkosten sehr gering.

Die Modifikation von textilbewehrtem Beton mit nanopartikulärem Titandioxid erweitert das Anwendungsspektrum dieses innovativen Baustoffes erheblich hinsichtlich Selbstreinigung und Schadstoffersetzung. Daneben weist die mit Titandioxid versetzte Oberfläche unter UV-Bestrahlung superhydrophile Eigenschaften auf, die genutzt werden könnten, um eine bessere Benetzbarkeit des Betons zu erzielen und so die Haftung zwischen einem Klebstoff und der Betonoberfläche zu maximieren.

Der Schwerpunkt des Instituts für Bauforschung (ibac) liegt in der Erforschung der titandioxidmodifizierten Feinbetonrezepturen im Hinblick auf Schadstoffabbau, Selbstreinigung und Klebeignung.

## 2 Materialien

Als Referenzmischung wurde eine Feinbetonmischung verwendet, die basierend auf /1/ im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ weiterentwickelt wurde. Die Mischungszusammensetzung für diese graue Feinbetonrezeptur ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Mischungszusammensetzung der Referenzmischung /1/

Table 2: Mix Composition of the Reference Mix /1/

| Ausgangsstoffe              | Einheit              | Zusammensetzung |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|
| 1                           | 2                    | 3               |
| CEM I 52,5 N (z)            | kg/m <sup>3</sup>    | 490             |
| Flugasche (f)               |                      | 175             |
| Silikastaub (s)             |                      | 35              |
| Bindemittelgehalt           |                      | 700             |
| Wasser                      |                      | 280             |
| Quarzmehl                   |                      | 500             |
| Quarzsand (0,2 mm – 0,6 mm) |                      | 714             |
| Fließmittel                 | M.-% vom Bindemittel | 0,65            |
| w/z                         | -                    | 0,57            |
| w/zeq <sup>1)</sup>         | -                    | 0,47            |

<sup>1)</sup>  $w/z_{eq} = w/(z+0,4 \cdot f+s)$

Bei den TiO<sub>2</sub>-modifizierten Mischungen wurde das inerte Quarzmehl durch unterschiedliche TiO<sub>2</sub> mit einem Anteil von 5 und 10 M.-% bezogen auf den Zement) ausgetauscht. An allen Mischungen wurden sowohl Frisch- als auch Festbetoneigenschaften untersucht und mit den Ergebnissen der Referenzmischung verglichen. Die hergestellten Probekörper wurden nach dem Ausschalen unterschiedlich gelagert.

- L5: 5 Tage Wasserlagerung bei 20 °C, anschließende Lagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte,  
 20/65: Lagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte und  
 CO<sub>2</sub>-frei: CO<sub>2</sub>-freie Lagerung bei 20 °C und 85 % relativer Luftfeuchte

### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Schadstoffzersetzung

In Bild 1 ist der Aufbau für die Versuche zur Schadstoffzersetzung der Feinbetone dargestellt. Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an den International Standard ISO 22197-1 /2/. Die Abmessungen der Kammer und die Probekörpergeometrie wurden jedoch etwas modifiziert.

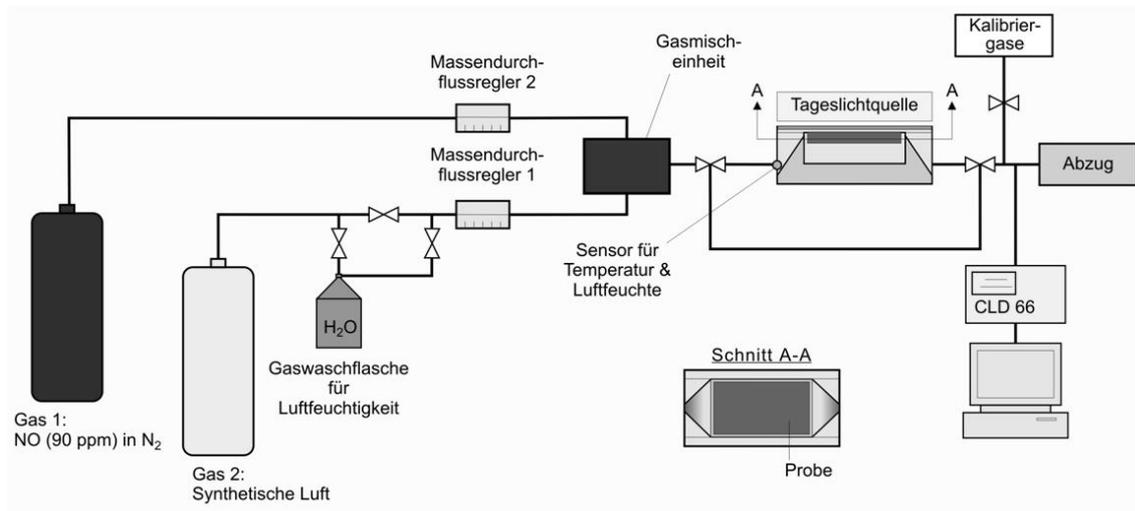


Bild 1: Versuchsaufbau Schadstoffzersetzung

Fig. 1: Test Set-Up for Pollutant Decomposition

Bei der Versuchsdurchführung werden 90 ppm NO in N<sub>2</sub> und synthetische Luft in einer Gasmischeinheit miteinander vermischt. Die synthetische Luft wird zuvor durch eine Gaswaschflasche geleitet, um bei dem Gasgemisch eine rel. Luftfeuchtigkeit von 50 % einzustellen. Mit den beiden Massendurchflussreglern werden die jeweiligen Durchflussraten geregelt, damit insgesamt eine Durchflussrate von 3,0 l/min erreicht wird. Das gemischte Gas, das auf eine Konzentration von 1 ppm NO<sub>x</sub> eingestellt wird, wird durch die Kammer, in der sich der Probekörper befindet, geleitet. Die Probe weist Abmessungen von 200 x 100 x 10 mm<sup>3</sup> auf. Des Weiteren ist ein Sensor zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit angebracht. Die Glasplatte besteht aus Quarzglas, damit möglichst wenig Strahlung der Tageslichtlampe absorbiert wird. Der Abstand der Probe zum Glas beträgt 3 mm. Die Reaktionskammer und die Schläuche bestehen aus Teflon, damit sich das Gas nicht anlagern kann, was zu einer Konzentrationsänderung führen würde. Die Tageslichtlampe ist so ausgerichtet, dass der Probekörper mit einer Bestrahlungsstärke von 10 W/m<sup>2</sup> im UVA-Bereich bestrahlt wird. Nachdem das Gas durch die Kammer geströmt ist, wird es mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLD) analysiert. Das Gerät misst im Wechselmodus NO und NO<sub>x</sub>. NO<sub>2</sub> wird anhand der Differenz der

beiden Messwerte berechnet. Da das Gerät pro Minute nur eine Gasmenge von 0,1 l analysiert, wird das restliche Gas abgesaugt.

### 3.2 Selbstreinigung

Titandioxidoberflächen werden unter Einfluss von UV-Licht superhydrophil, wodurch Schmutzpartikel abgewaschen werden können. Bei den Versuchen zur Selbstreinigung werden die Probekörper entweder vor oder nach Aufbringen der verschiedenen Schmutzstoffe bestrahlt. Als Bestrahlungsquellen wurde ein „UVASPOT 400 F/2“ bzw. eine ULTRA VITALUX 300W verwendet. Bei einigen Versuchen wurde eine Filterscheibe im UVB-Bereich eingesetzt. Die Bestrahlung erfolgt immer senkrecht zur Probekörperoberfläche, wobei jeweils die Hälfte einer Probenseite abgedeckt wird. Die Bestrahlungsstärke wird mit einem Radiometer überprüft.

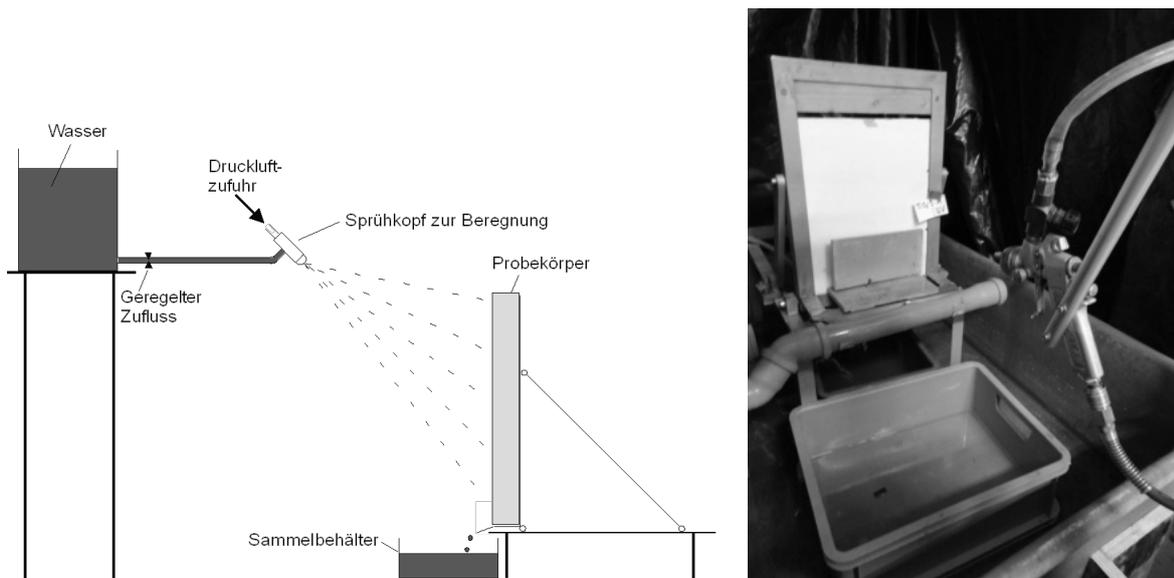


Bild 2: Versuchsaufbau für die Selbstreinigung

Fig. 2: Test Set-Up for Selfcleaning

Die Probekörper werden in einem Versuchsstand einer Beregnung ausgesetzt, wobei normales Leitungswasser mittels Druckluftzufuhr durch eine Düse zu feinem Regen zerstäubt wird. Der schematische Versuchsaufbau ist in Bild 3, links und der reale Versuchsstand rechts abgebildet. Die Betrachtung der Probekörper vor und nach der Bestrahlung und Beregnung erfolgt zum einen visuell, zum anderen werden die Farbveränderungen mit einem Farbkolorimeter untersucht.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Schadstoffersetzung

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen der schadstoffersetzenden Eigenschaften zusammengefasst. Sie zeigt, ob ein Einflussfaktor günstige oder ungünstige Auswirkungen auf die schadstoffersetzenden Eigenschaften hat. Bei der Veränderung einiger Einflussfaktoren waren sowohl positive als auch negative Auswirkungen zu beobachten.

Tabelle 3: Zusammenfassende Tabelle für die schadstoffzersetzenden Eigenschaften

Table 3: Summary of Pollutant Decomposing Properties

| Einflussfaktor                         |                                     | Trend   | Auswirkung auf die schadstoffzersetzenden Eigenschaften |    |
|--|-------------------------------------|---------|---|----|
| 1                                      |                                     | 2       | 3   |    |
| Lagerung                               | L5 <sup>1)</sup>                    | -       | ---   |    |
|  | 20/65 <sup>1)</sup>                 |         | +++   |    |
|  | CO <sub>2</sub> -frei <sup>1)</sup> |         | ++  |    |
|  | Feuchtschrank, 7 Tage <sup>1)</sup> |         | --  |    |
|  | Schalung, 7 Tage <sup>1)</sup>      |         | -   |    |
|  | Außenlagerung <sup>1)</sup>         |         | --  |    |
| Oberflächentextur                      |                                     |         | Zunahme   | o  |
| Mischungszusammensetzung               |                                     |         |   | o  |
| Trennmittel                            |                                     |         |   | o  |
| Ausschalalter                          |                                     |         |   | -- |
| w/z <sub>eq</sub> -Wert                |                                     | --      |   |    |
| Größtkorndurchmesser                   |                                     | +       |   |    |
| Luftporengehalt                        |                                     | o       |   |    |
| Alter                                  | L5                                  | +       |   |    |
|  | 20/65                               | +       |   |    |
|  | CO <sub>2</sub> -frei <sup>2)</sup> | --      |   |    |
|  | Feuchtschrank, 7 Tage               | +       |   |    |
|  | Schalung, 7 Tage                    | --      |   |    |
|  | Außenlagerung                       | +       |   |    |
| Oberflächenfarbe hell                  |                                     | Zunahme | o   |    |
| Fließmittel                            |                                     |         | ++  |    |
| Luftfeuchte                            |                                     |         | --  |    |
| Schadgaskonzentration <sup>3)</sup>    |                                     |         | --  |    |
| Durchflussmenge                        |                                     |         | --  |    |
| TiO <sub>2</sub> -Gehalt <sup>4)</sup> |                                     |         | +   |    |
| Betonzusatzstoffe <sup>5)</sup>        |                                     |         | -   |    |

+++ : sehr günstig, ++ : günstig, + : tendenziell günstig, o : sowohl positiv als auch negativ, --- : sehr ungünstig, -- : ungünstig, - : tendenziell ungünstig,

1) Abhängig vom Alter

2) Überlagerung des Einflusses durch hohe relative Feuchte (85 %) möglich

3) Absolut konnte mehr, relativ jedoch weniger abgebaut werden

4) Zwischen 2 und 10 M.-% vom Zementgehalt relativ gleich, aber tendenziell war eine Zunahme vorhanden

5) Ohne Betonzusatzstoffe waren die Abbauraten i. d. R. am besten, bei einer Steigerung näherte sich der Schadstoffabbau einem Grenzwert, der auch bei höheren Zugaben erreicht wurde.

Die Ergebnisse des Verbundforschungsvorhabens zeigen, dass mit titandioxidmodifiziertem Textilbeton ein sinnvoller Beitrag zur Schadstoffreduktion von  $\text{NO}_x$  vor allem in urbanen Bereichen geleistet werden kann. In /3/ werden die Ergebnisse von Simulationen aktiver Fassaden aufgeführt. Die maximalen Abbauraten photokatalytisch aktiver Fassaden werden mit 1,84 bis 9,75 % angegeben. Die im Verbundvorhaben erzielten Abbauraten bei der Außenlagerung liegen in diesem Bereich, wodurch sich ein sinnvolles Anwendungsgebiet titandioxidmodifizierter Feinbetone und somit von Textilbeton ergibt.

## 4.2 Selbstreinigung

Der zu untersuchende selbstreinigende Charakter basiert auf zwei unterschiedlichen Stoffeigenschaften: Der photokatalytische Wirkung und der lichtinduzierten Verstärkung der Wasserbenetzung, die einen Zeitraum nach der Bestrahlung andauert. Bei den Laboruntersuchungen wurden die Wirkungen der Photokatalyse und der Reinigung infolge einer Regensimulation getrennt voneinander untersucht. So sollten qualitative Ergebnisse für die einzelnen Selbstreinigungsmechanismen herausgearbeitet werden. Es wurde festgestellt, dass sowohl bei den Feinbetonproben mit Titandioxid als auch bei den Referenzproben ohne Titandioxid infolge einer Bestrahlung grundsätzlich Verfärbungen von organischen Farbstoffen vermindert werden. Allerdings konnten Oberflächen mit  $\text{TiO}_2$  Rhodamin B und Methylenblau etwas schneller abbauen. Auch eine Veränderung der Benetzung infolge einer UV-Licht-Bestrahlung lässt sich bei titandioxidmodifizierten Feinbetonprobekörpern, aber auch bei Referenzproben ohne  $\text{TiO}_2$  festhalten. Es ist insgesamt auffällig, dass Proben, welche vorher bestrahlt wurden, grundsätzlich schlechter angeschmutzt werden. Somit wird angenommen, dass eine Bestrahlung vor dem Anschmutzen einen Einfluss auf die Haftung von Verunreinigungen hat.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Bestimmung der Wirkung dieser veränderten Wasserbenetzung konnte ein weiterer Effekt der durch die  $\text{TiO}_2$ -Modifikation hervorgerufen wird, herausgestellt werden. Durch die Zugabe von  $\text{TiO}_2$  in den Feinbeton wird vermutlich eine Strukturveränderung der Oberfläche hervorgerufen, wodurch sich das Benetzungsverhalten ändert. Es konnte gezeigt werden, dass superhydrophile Eigenschaften auf  $\text{TiO}_2$ -Oberflächen möglich, aber ebenfalls bei den Referenzprobekörpern ohne  $\text{TiO}_2$  möglich sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen sprechen dafür, dass auf der Oberfläche der titandioxidmodifizierten Feinbetonmischungen Verschmutzungen schlechter anhaften, sodass eine Reinigung durch herablaufende Wasserfilme verbessert wird.

Die Untersuchungen, bei denen aufgesetzte Tropfen auf den Probenoberflächen betrachtet wurden, lieferten wichtige und als wertvoll anzusehende Erkenntnisse über das generelle Benetzungsverhalten der untersuchten Proben. Dabei konnte gezeigt werden, dass Verunreinigungen einen erheblichen Einfluss auf die Benetzbarkeit der Oberfläche haben. Bei der Herstellung der Probekörper werden diese von der Schalungsoberfläche und beim Vorgang des Ausschalens unweigerlich verunreinigt. Um solche Verunreinigungen möglichst gering zu halten, wurden die Proben vor den Untersuchungen einer Reinigung unterzogen. Trotz der Reinigung mit destilliertem Wasser konnte bei einigen Proben festgestellt werden, dass ein teilweise heterogenes Benetzungsverhalten bei den Proben einer Titandioxidmischung vorlag. Da nach einem Abspülen mit 2-Propanol ein sehr homogenes Benetzungsverhalten zu sehen war, wird vermutet, dass durch das Reinigungsverfahren mit destilliertem Wasser Verunreinigungen nicht vollständig entfernt werden konnten.

Einen Modellschmutzstoff zu finden gestaltet sich schwierig. Entweder haften die Schmutzstoffe zu stark oder überhaupt nicht. Einige waren nicht UV-resistent, andere zeigten keine eindeutigen Unterschiede zwischen den  $\text{TiO}_2$ - und den Referenzprobekörpern. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Selbstreinigungseffekt als Kombination der photokatalytischen Aktivität und der Superhydrophilie bei den untersuchten Schmutzstoffen nicht vorhanden war. Somit war es sehr schwer möglich, realitätsnahe Verschmutzungen hinsichtlich Menge und Fläche aufzubringen. Daher sind die aufgebrachten Mengen vermutlich zu groß gewesen. Es ist aus der Literatur bekannt, dass beispielsweise Biofilme auf titandioxidmodifizierten Werkstoffen zersetzt werden können. Die organischen Stoffe setzen sich erst mit der Zeit nieder und haften auch teilweise nicht so stark. Da grundsätzlich ein Aufbringen von Schmutzstoffen, bedingt durch die schlechte Haftung auf den

Feinbetonproben, im Rahmen des Projekts oft schwierig war, mussten die Schmutzstoffe mit dem Pinsel aufgebracht werden, was nicht als realitätsnah zu bezeichnen ist. Dadurch waren die Ergebnisse teilweise schlechter als es bei einer natürlichen Bewitterung vermutlich der Fall gewesen wäre. Die belegen die Untersuchungen der Auslagerung. Bei der Auslagerung zeigte sich, dass es bei den Platten mit Titandioxid im Allgemeinen und mit zunehmendem Gehalt zu geringen Farb- und Helligkeitsunterschieden über die Zeit gekommen ist als bei der Referenzserie, was auf eine bessere Selbstreinigung und/oder schwierigeres Beschmutzen zurückzuführen ist.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhabens TiO<sub>2</sub>TRC konnte gezeigt werden, dass grundsätzlich ein positiver Effekt der Schadstoffreineigung durch modifizierte Betonoberflächen erreicht werden kann, die Effektivität allerdings von einigen Randbedingungen abhängig ist. Weitere Details dazu befinden sich in /4, 5, 6, 7, 8, 9,10/. Hinsichtlich der Selbstreinigung waren die Ergebnisse zunächst nur bedingt überzeugend. Hier muss sicher noch mehr Forschungsarbeit geleistet werden, um ungünstige Einflussparameter herauszuarbeiten.

Das Projekt hat in dem Bereich Kleben gezeigt, dass mit organischen Klebern titandioxidmodifizierte Oberflächen hervorragend miteinander verbunden werden können, allerdings bei mineralische Klebern, die insbesondere bei Fragen des Brandschutzes sehr viel geeigneter erscheinen, noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Die Untersuchungen zur Bilanzierung ergaben in diesem ersten Schritt ein etwas diffuses Bild. Da die Effektivität der Schadstoffreduzierung natürlich von den Randbedingungen, denen das Bauwerk unterliegt, abhängen, kann nicht immer von einer positiven Ökobilanz bei Einsatz von Titandioxid gesprochen werden. Da auch die Selbstreinigung stark von der Behandlung der Bauteile abhängt, lässt sich für titandioxidmodifizierten Beton nicht pauschal eine positive Bilanz aufstellen, was zunächst erwartet wurde. Hier ist in Bezug auf die Effektivität noch erheblicher Forschungsbedarf.

## 6 Literatur

- /1/ Brockmann, T: Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for Textile Reinforced Concrete, - In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University, Nr. 13; Zugl. Aachen, Technische Hochschule, Diss. 2005
- /2/ SO 22197-1:2007-09 Hochleistungskeramik - Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftreinigungsvermögens von halbleitenden photokatalytischen Werkstoffen - Teil 1: Entfernung von Stickoxid
- /3/ Bruse, M. ; Droll, K.: Betonbauteile mit photokatalytisch aktivierten Oberflächen - Eine Chance zur Reduzierung des NO<sub>x</sub>-Gehaltes in Städten: Untersuchungs-ergebnisse und Modellierungsansätze. Bergisch Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen, BAST, 2011. - In: Kolloquium Luftqualität an Straßen, Bergisch Gladbach 30. und 31.März 2011, 36 Seiten
- /4/ Brameshuber, W.: Neunzig, C. ; Nebel, H.: Verbundprojekt: TiO<sub>2</sub>TRC - Neue Funktionalität von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen - Teilvorhaben: Titandioxidmodifizierte Feinbetonmischungen. Aachen : Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2011. - Forschungsbericht Nr. F 970/4
- /5/ Neunzig, C.: Steinhoff, J. ; Brameshuber, W.: TiO<sub>2</sub>TRC - New Features of TRC by Titanium Dioxide Modifications : TiO<sub>2</sub>TRC -Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen. Bagnaux : RILEM, 2011. - In: International Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Technology, Hong Kong, 5-7 September 2011, Kap 9, 9 Seiten ISBN 978-2-35158-117-9
- /6/ Brameshuber, W.; Neunzig, C.: Pollutant-Reducing Textile-Reduced Concrete for the Sake of Our Environment : Schadstoffreduzierter Textilbeton der Umwelt zuliebe. In: BFT International 78 (2012), Nr. 2, S. 14-15 ISSN 0373-4331
- /7/ Brameshuber, W.; Neunzig, C.: TiO<sub>2</sub> TRC - New Features of TRC by Titanium Dioxide Modifications; TiO<sub>2</sub>TRC - Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen. London [u.a]: CRP Press Taylor & Francis Group, 2012. - In: Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, September 3-5, 2012 ISBN 978-0-415-89952-9

- /8/ Brameshuber, W.; Neunzig, C.: TIO2TRC - Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen: TIO2TRC - New Features of TRC by Titanium Dioxide Modifications Weimar: F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2012. - In: 18. Internationale Baustofftage, Weimar, 12.-15. September 2012, (Ludwig, H.-M. (Ed.)), S. 1 0583-1 0590 ISBN 978-3-00-034075-8
- /9/ Brameshuber, W ; Neunzig, C.: Schadstoffreduzierender Textilbeton: Pollutant Decomposing Textile Reinforced Concrete. In: Innovative Fassadentechnik (2013), September, Special, S. 110-113
- /10/ Brameshuber, W. ; Nebel, H. ; Neunzig, C. ; Steinhoff, J.: Neue Funktionalitäten von Textilbeton durch Titandioxidmodifikationen - Teilvorhaben: Titandioxidmodifizierte Feinbetonmischungen. Aachen : Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2013. - Forschungsbericht Nr. F 970/8

# **Erforschung eines reaktiven Markersystems für Tiefenhydrophobierungen nanoporöser, zementgebundener Werkstoffe**

SILAMARK

Klaus Bienert

*Specht Kalleja + Partner Beratende Ingenieure GmbH*

Gerd Wilsch

*Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (BAM)*

## **1 Grundlagen und Motivation**

Stahlbetonbauwerke der Verkehrsinfrastruktur sind nutzungsbedingt Expositionen ausgesetzt, die zu Schäden an der Konstruktion führen können. Dabei ist in erster Linie die Einwirkung von tausalzhaltigen Wässern im Winter zu nennen, die durch den Beton kapillar und über Diffusionsvorgänge aufgenommen werden. Ein Weg, die kapillare Wasseraufnahme zu unterbinden, ist eine Tiefenhydrophobierung der Werkstoffoberflächen durch siliziumorganische Verbindungen. Die Wirksamkeit und die Dauerhaftigkeit dieser Tiefenhydrophobierungen werden im Wesentlichen durch die Eindringtiefe und den Wirkstoffgehalt in der Betonrandzone bestimmt. Diese beiden Parameter gilt es also in der Qualitätssicherung zu überprüfen.

Bisherige Verfahren zur Qualitätssicherung einer hydrophobierenden Maßnahme sind mit einer Bohrkernentnahme verbunden, da die Analysen im Labor durchgeführt werden müssen. Andere Verfahren arbeiten zwar zerstörungsfrei und können am Objekt durchgeführt werden, liefern aber keine Informationen über die Eindringtiefe und Wirkstoffverteilung. Das Fehlen eines geeigneten analytischen Verfahrens hat eine breite praktische Anwendung der als technisch sehr leistungsfähig geltenden Tiefenhydrophobierungen bisher verhindert.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens wurde ein Verfahren entwickelt mit dem direkt vor Ort die Hydrophobierung nachgewiesen und hoch aufgelöst die Wirkstoffverteilung in der Betonrandzone detektiert werden kann. Zu diesem Zweck mussten „reaktive Marker“ entwickelt werden, die dem eigentlichen Hydrophobierungsmittel zugesetzt werden. Durch die anschließende tiefenaufgelöste Detektion mit der „Laser Induced Breakdown Spectroscopy“ (LIBS) konnte dann anhand der Verteilung des Markerelementes qualitativ und quantitativ der Wirkstoffgehalt bestimmt werden.

Das Vorhaben SILAMARK wurde als Verbundprojekt unter Beteiligung der Sto SE & Co. KGaA, der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft (HsKa), der Aqua Stahl GmbH und der Specht Kalleja + Partner Beratende Ingenieure GmbH realisiert.

## **2 Markerauswahl und Markieranbindung**

### **2.1 Anforderungen an den Marker**

Eine Hydrophobierung ist ein leistungsfähiger Oberflächenschutz für durch Feuchtigkeit und die darin enthaltenen Schadstoffe beanspruchte Bauwerke aus zementgebundenen Werkstoffen. Wirkstoffe der Hydrophobierung sind häufig Alkyltrialkoxysilane, wie z. B. Isooctyltriethoxysilan (IOTES). Da der elementare Unterschied zwischen einer Hydrophobierung und Beton zu gering ist, um ihn mit LIBS zu delektieren, musste dazu ein „reaktive Marker“ entwickelt werden, der nicht im System zementgebundener Werkstoff/IOTES vorkommt. Weiterhin durfte der Marker die Eigenschaften der Hydrophobierung nicht verändern und den Hydrophobierungsprozess des Systems

Hydrophobierungsmittel – Beton nicht negativ beeinflussen. Zudem durfte weder die Wirksamkeit noch die Dauerhaftigkeit der Hydrophobierung vermindert werden. So musste die markierte Hydrophobierung unempfindlich gegen äußere Einflüsse (Karbonatisierung, Alkalien und Chloride, Witterung) bleiben. Der Marker bzw. die Markeranbindung sollte auch unter Einwirkung typischer Einflüsse wie Sauerstoff, Feuchte und Licht ausreichend lagerstabil bleiben. Um Chromatographie-Effekte zu verhindern war eine feste Anbindung des Markers an die Hydrophobierung erforderlich.

Die Eindringtiefe des Markers in die Betonrandzone musste der Eindringtiefe der Hydrophobierung entsprechen. Im Hinblick auf den Nachweis der Wirkstoffverteilung ist zudem ein konstantes Verhältnis von Marker und Hydrophobierung erforderlich. Auch die Verarbeitung und die Applikationstechnik der Hydrophobierung durften nicht negativ beeinflusst werden.

## 2.2 Auswahl und Anbindung des Markers an die Hydrophobierung

Um Störungen durch den zementgebundenen Werkstoff auszuschließen, wurden die Zusammensetzungen von Zementen und üblichen Zuschlagsstoffen recherchiert bzw. entsprechende Elementaranalysen durchgeführt. Nach zahlreichen Löse- und Komplexbildungsversuchen mit verschiedenen Lösemitteln ergab der Ansatz, Metallsalze durch Komplexbindung in die Hydrophobierung zu integrieren, die besten Ergebnisse. Neben Elementen Cobalt und Nickel konnte dabei Silber als besonders geeignetes Markerelement ermittelt werden. Das entwickelte Markersystem besteht aus IOTES (Hydrophobierungswirkstoff), Poly-Amin-Siloxan (Komplexbildner) und ethanolischer Metallsalzlösung (Ag bzw. Ni, Co). Mit diesen Mischungen wurde das Transportverhalten in zementgebundenen Werkstoffen untersucht. Für weitere Untersuchungen wurden drei verschiedene Markerkonzentrationsverhältnisse verwendet: 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm (jeweils in der fertig gemischten Hydrophobierung). Für die Messkampagnen wurden überwiegend Zementstein- und Mörtelprobekörper verwendet. Dabei wurden die Ergebnisse der LIBS-Messungen mittels der FTIR (Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie) validiert.

## 3 Optimierung des LIBS Messverfahrens für das Nachweissystem

### 3.1 Anpassung der LIBS-Laborsysteme zum Nachweis des Markers

Mit der BAM-LIBS-Laborapparatur wurden zunächst an speziell hergestellten Probensätzen die Nachweisgrenzen der als Marker vorgesehenen Elemente, die Genauigkeit und die optimalen Betriebsparameter ermittelt. Für jedes Element wurden geeigneten Spektrallinien identifiziert und mit dem Labor-System detektiert. Der dazu genutzte Aufbau ist schematisch in nachfolgender Abbildung dargestellt.

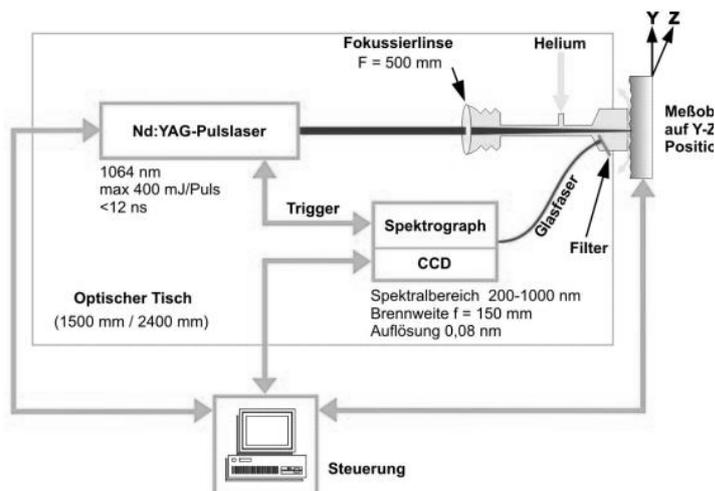


Bild 1: Schematischer Aufbau des LIBS-Labor-Systems

Zur Ermittlung der maßgeblichen Nachweisgrenzen wurden Presslinge aus Zement mit bekannter Zugabe des als Marker vorgesehenen Elementes hergestellt und mit den oben aufgeführten LIBS-Systemen untersucht. Zur Herstellung wurden nicht hygroskopische Verbindungen benutzt (Nickelcarbonat, Kobaltoxid und Silbernitrat). Der Marker Silber zeigt dabei die größte Empfindlichkeit (vgl. Bild 2).

In einen weiteren Schritt wurden zur Visualisierung des Eindringens der markierten Hydrophobierung und der Erstellung von Tiefenprofilen Messungen an Betonbohrkernen ( $\varnothing$  100 mm) durchgeführt. Dabei wurden die Bohrkern 24 Stunden bzw. 66 Stunden in eine mit Silber (Ag-1000) markierten Hydrophobierung gestellt. Nach dem Saugen wurde der Bohrkern für die Untersuchung des Eindringprofils in der Mitte trocken gesägt. In einer ersten Messreihe erfolgte mit dem ESA-System die Erfassung der Elementverteilung von Ag über die Tiefe. Anschließend wurde eine zweite Messreihe mit dem Andor System für Wasserstoff, Kohlenstoff, Chlor und Sauerstoff. Dies diente der Feststellung ggf. vorhandener sich überlagernder Prozesse.

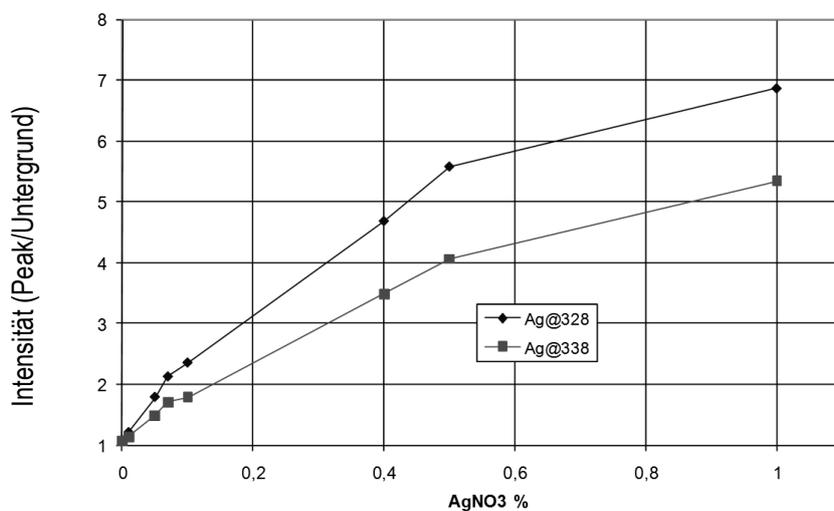


Bild 2: Zusammenhang normierte LIBS-Intensitäten und Markerkonzentration

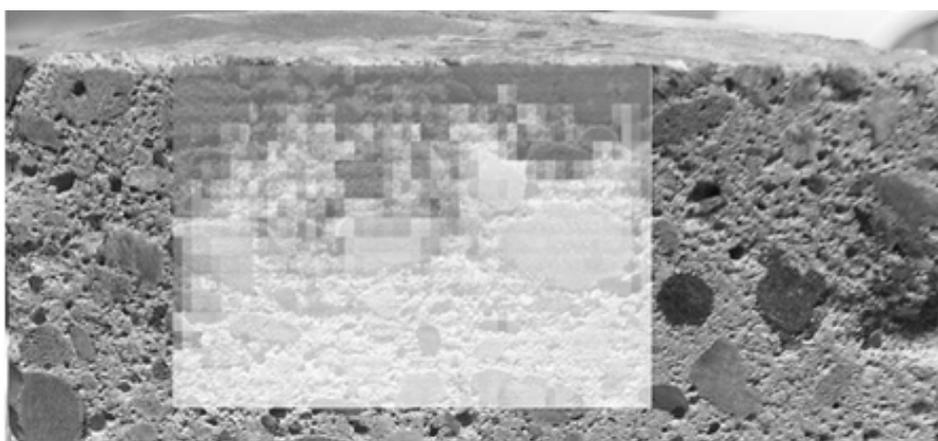


Bild 3: Foto der Querschnittsfläche des Bohrkerns mit überlagertem LIBS-Ergebnis (Intensität der Ag-Linie bei 328 nm)

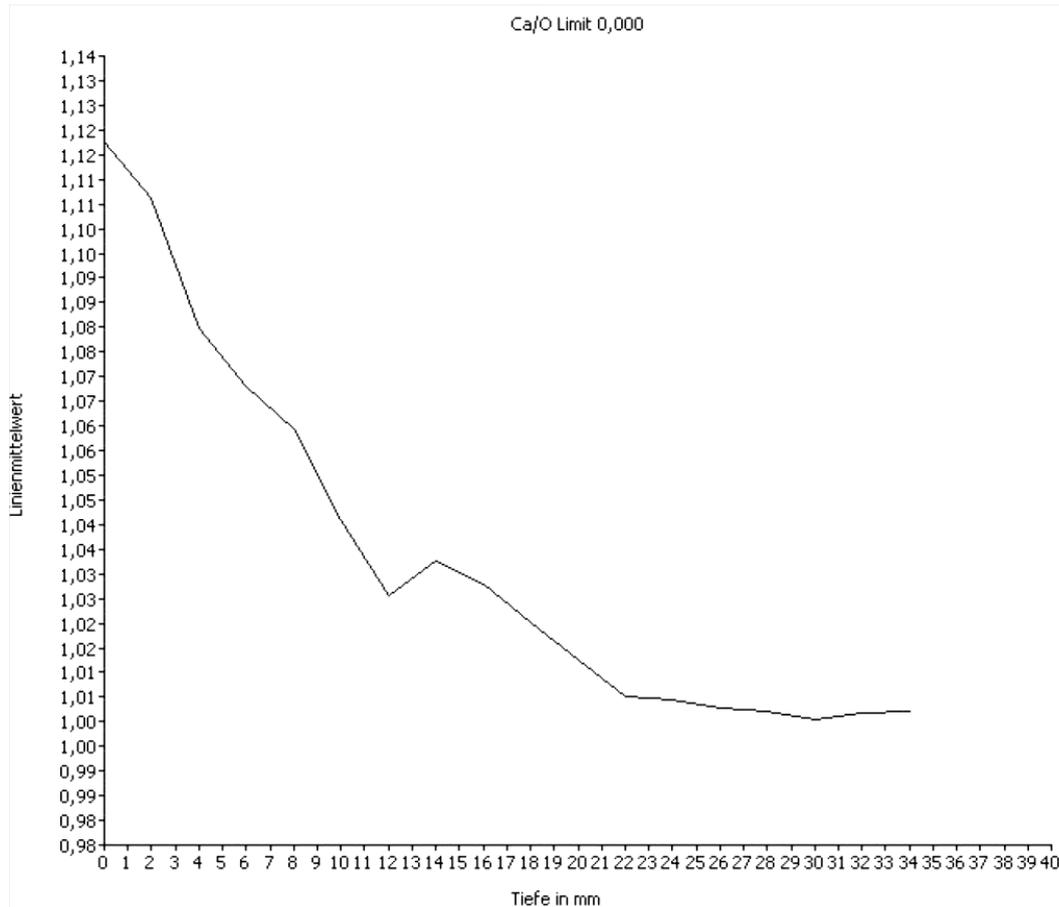


Bild 4 Eindringprofil der markierten Hydrophobierung. Messung nach 24 Stunden saugen von IOTES+1000 ppmAg

### 3.2 Mobiles LIBS-System

Nach den erfolgreichen Tests des Messkonzeptes im Labor wurde ein mobiles LIBS-System für den Nachweis des Markers entwickelt und optimiert. Dazu wurde ein an der BAM vorhandenes mobiles LIBS-System als Basis genutzt. Der Scanner wurde mit Saugfüßen ausgestattet (vgl. auch Bilder 9 und 10), so dass vor Ort auch Messungen an senkrechten Flächen möglich sind. Wie im nachfolgenden Bild dargestellt, konnten auch bei den Testmessungen mit dem mobilen LIBS-System die zum Nachweis der markierten Hydrophobierung geeigneten Spektrallinien eindeutig detektiert werden.

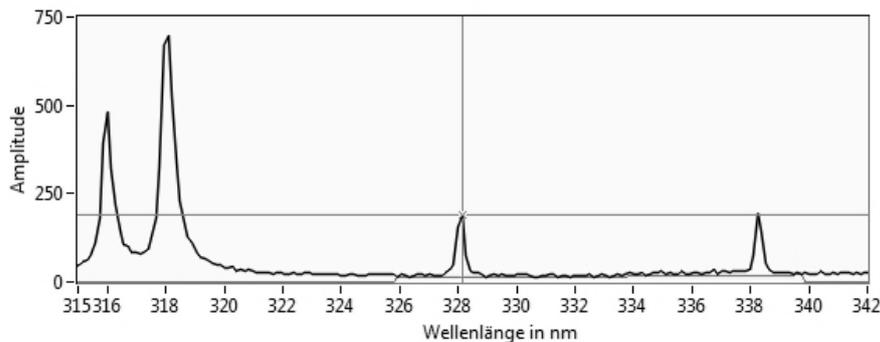


Bild 4: Typisches Spektrum aufgenommen mit dem portablen Spektrometer an einer Betonprobe die 1% Silber enthält und dem Silber zugeordnete Peaks bei 327,8 nm und 338,1 nm

## 4 Referenzmessungen und Praxisversuche

### 4.1 Messkampagnen an Ersatzbauwerken

Zunächst wurden mit der entwickelten Nachweismethodik Messkampagnen an eigens für das Forschungsvorhaben hergestellten Ersatzbauwerken durchgeführt. In Anlehnung an typische Betonrezepturen für Infrastrukturprojekte wurden für die Herstellung der Ersatzbauwerke drei geeignet Zemente und zwei Wasser-Zement-Werte ausgewählt.



Bilder 5 und 6: Ersatzbauwerke auf dem BAM-Testgelände

Durch die gewählte Form der Ersatzbauwerke konnten vertikale, horizontale und schräge Testflächen modelliert werden. Weiterhin war es möglich direkt berechnete („außen“) und nur der Außenluft ausgesetzte („innen“) Flächen zu erhalten. Zur Simulation der maßgeblichen Expositionen wurde ein Chloridbeaufschlagungs- und Beregnungssystem geplant und angewendet. Nach unterschiedlichen Expositionszeiträumen wurden dann Messungen durchgeführt bzw. Bohrkern für Validierungsmessungen im Labor entnommen. Bei den Oberflächenmessungen konnte das Markerelement eindeutig detektiert werden. Es ist somit mit der Messmethodik eine schnelle und eindeutige Identifikation der markierten Hydrophobierung möglich. Auch bei den Messungen an den geschnittenen Bohrprofilen konnten überwiegend eindeutige Tiefenprofile festgestellt werden. Nachfolgend ist beispielhaft ein Tiefenprofil dargestellt.

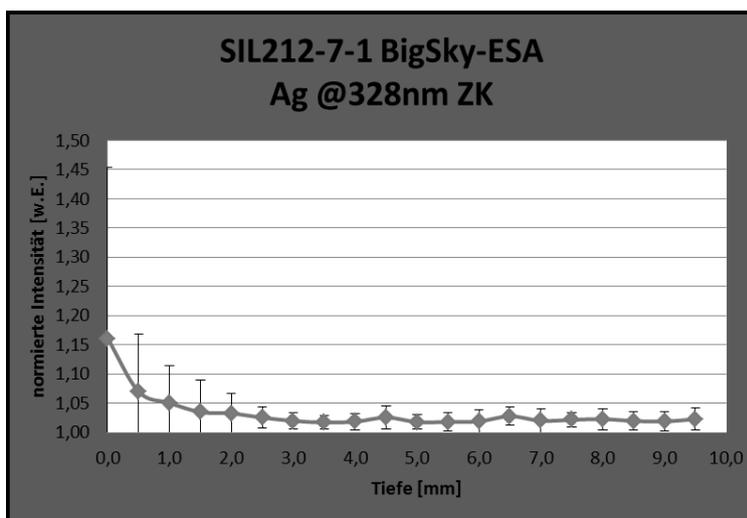


Bild 7: Tiefenprofil Marker LIBS

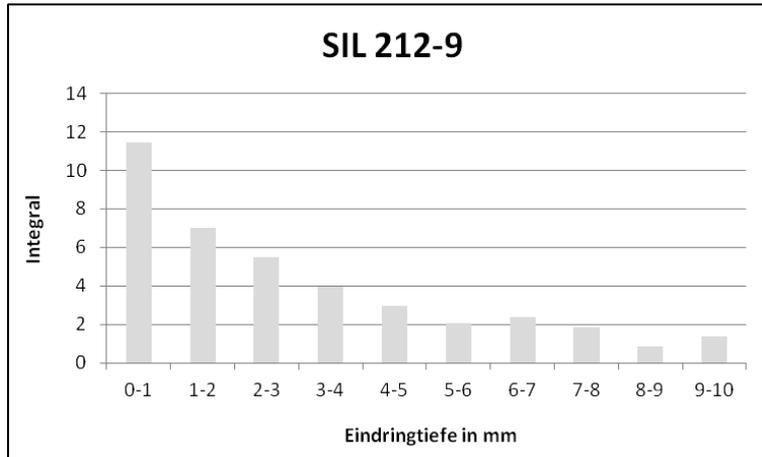


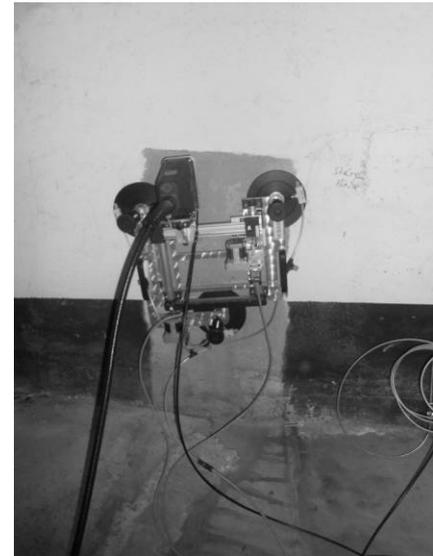
Bild 8: Wirkungprofil Hydrophobierung FTIR

Mit den durch die HsKa durchgeführten Validierungsmessungen mittels FT-IR konnte auch ein Eindringen des Hydrophobierungswirkstoffes in die Betonrandzone festgestellt werden. Zum besseren Vergleichbarkeit sind in den Bildern 7 und 8 die mittels LIBS festgestellten Tiefenprofile, den FT-IR Messungen der Hochschule Karlsruhe gegenübergestellt. Ergänzend wurden an der HsKa die jeweiligen Wasseraufnahmekoeffizienten überprüft. Es ergab sich eine ausreichende Wirksamkeit der Hydrophobierung sowohl mit als auch ohne Markierung.

#### 4.2 Praxismessungen an Referenzobjekten

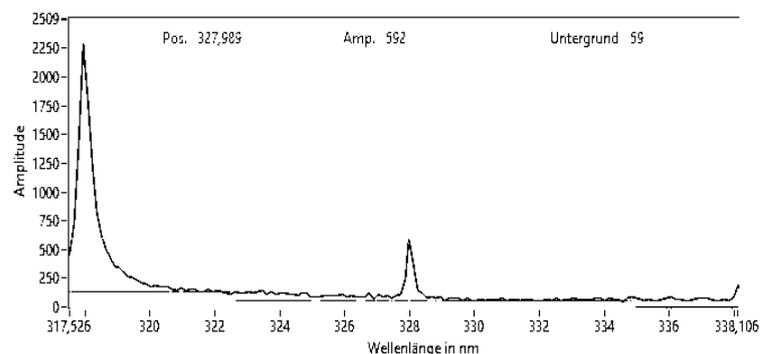
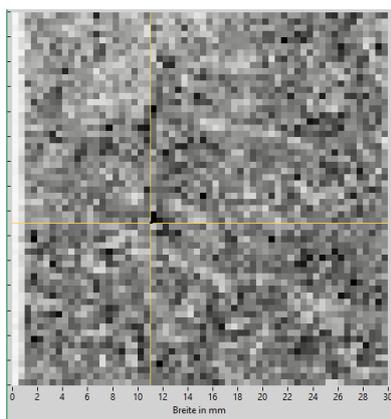
Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der Messmethodik wurde im Rahmen des Vorhabens an einem Parkhaus und an zwei Brückenbauwerken LIBS-Messungen durchgeführt. Diese dienen insbesondere der Überprüfung des mobilen LIBS-Systems unter Praxisbedingungen sowie der Optimierung des Handlings und der Bedienbarkeit. Das ausgewählte Parkhaus wurde Mitte der 1960er-Jahre als Stahlbetonbau errichtet.

Aufgrund der im Nutzungszeitraum entstandenen zahlreichen Schäden an der Betonkonstruktion erfolgte ab 2013 eine Grundinstandsetzung des Parkhauses. Vor den durchzuführenden Betoninstandsetzungsarbeiten wurde an zwei jeweils vertikalen und horizontalen Testflächen eine Hydrophobierung mit und ohne Markierung appliziert. Nach ca. 4 Monaten erfolgte ein Messeinsatz mit dem mobilen LIBS – System.



Bilder 9 und 10: Einsatz mobiles LIBS in einem Parkhaus in Köln. Links: Gesamtansicht + rechts: mobiler Scanner an Wandfläche

Mit der angewendeten Messmethodik konnte ohne Verzögerung messbegleitend die markierte Hydrophobierung nachgewiesen werden. Aufgrund des mit Saugfüßen ausgestatteten Grundrahmens sind Messungen an horizontalen und vertikalen Flächen möglich. Je nach gewählter Auflösung muss mit Messzeiten zwischen 3 und 20 Minuten kalkuliert werden. Die Messdaten können unmittelbar vor Ort ausgewertet werden. Dazu wurde das Programm LIBS Auswertung V 0.49 der BAM verwendet. Die Rohdaten werden hierbei zeilenweise eingeladen und im Programm als Fläche dargestellt. Weitere Angaben zur Messung werden automatisch in einer Datei abgelegt. So können alle Parameter der Messung nachvollzogen werden. Wegen möglicher wechselnder äußerer Randbedingungen (z. B. Temperatur) sind bei jedem Messeinsatz parallel Kalibrierungsmessungen an genormten Prüfkörpern durchzuführen.



Bilder 11 und 12: Ergebnis der Messung an einer mit IOTES + 1000 ppm Silber behandelten Messfläche, links: Verteilung des normierten LIBS-Signals für Silber + rechts: Spektrum im Bereich der Silber Linie

## 5 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SILAMARK ist es gelungen eine Messmethodik zu entwickeln mit der, basierend auf dem entwickelten Markersystem und der darauf abgestimmten Laser Induced Breakdown Spectroscopy als Prüfverfahren, ein Nachweis der Hydrophobierung auf der Baustoffoberfläche und deren Eindringtiefe in die Betonrandzone möglich ist. Voraussetzung war die Entwicklung einer chemisch stabilen Anbindung eines Markers an die Tiefenhydrophobierung durch die Hochschule Karlsruhe ohne die Eigenschaften der Hydrophobierung negativ zu verändern.

Die Anwendung des mobilen LIBS-Systems hat sich bei den ersten unter Praxisbedingungen durchgeführten Messungen an den Referenzbauwerken bewährt und somit konnte die prinzipielle Baustellentauglichkeit der entwickelten Messmethodik nachgewiesen werden. Damit ist es möglich direkt nach der Applikation der Hydrophobierung das verwendete Produkt zu identifizieren und die erforderliche Qualitätssicherung durchzuführen. Mit weiteren Praxistests im größeren Maßstab und insbesondere mit einer Aufnahme des Messverfahrens in einschlägige Richtlinien und Normen könnte die allgemeine Akzeptanz für eine Anwendung von Tiefenhydrophobierungen deutlich gesteigert werden.

## 6 Ausblick

Die aus dem Forschungsvorhaben resultierenden Ergebnisse haben aus Sicht der Projektbeteiligten gute wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Durch die alternde Infrastruktur, Umwelteinflüsse und die längere Nutzungsdauer wesentlicher Infrastrukturbauwerke wird die Qualitätssicherung von Instandhaltungsmaßnahmen zunehmend bedeutsamer. Sie kann jetzt direkt bei der technischen Anwendung, wie auch im Rahmen der Bauwerksuntersuchungen innerhalb der Nutzungsphasen vor Ort erfolgen. Das mobile LIBS-System mit integriertem Scanner ließe sich parallel auch für andere Prüfaufgaben vor Ort einsetzen. So wäre der Einsatz für ein Oberflächenmapping von Chloriden, Sulfaten und Alkalien denkbar. Eine Markierung und entsprechende Detektion wäre prinzipiell auch zur Erkennung und Identifizierung von Bauprodukten, Bauchemikalien und korrekten Mischungsverhältnissen einsetzbar.

## 7 Literatur

- /1/ Gerdes, A.; Herb, H.: Teilschlussbericht Verbundprojekt SILAMARK FKZ 13N10648. Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (September 2014).
- /2/ Müller, J.: Teilschlussbericht Verbundprojekt SILAMARK FKZ 13N10652. Sto SE & Co. KGaA (August 2014).
- /3/ Brösamle, S.: Teilschlussbericht Verbundprojekt SILAMARK FKZ 13N10651. Aqua Stahl GmbH Kißlegg (September 2014).
- /4/ Gerdes, A.: Transport und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone. Building Materials Report No 15, AEDIFICATIO Verlag, Freiburg i. B., (2001).
- /5/ Wilsch G., Schaurich D., Weritz F.: Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy. Construction and Building Materials, 19, 724-730 (2005).
- /6/ Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team (2014): NIST Atomic Spectra Database (version 5.2), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [Friday, 10-Oct-2014 05:48:47 EDT]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- /7/ Molkenhain, A., Weritz, F., Schaurich, D., Wilsch, G.: Imaging of cation and anion transport in building materials by laser-induced breakdown spectroscopy. In: Proceedings of 5th International Essen Workshop, Transport in concrete, Essen, Germany, 2007.
- /8/ Molkenhain, A.: Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) zur hochauflösenden Analyse der Ionenverteilung in zementgebundenen Feststoffen., Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Essen 2008.
- /9/ Wiggerhauser, H.: et al., Analysis of concrete using LIBS (Reprinted from Non-Destructive Testing Civil Engineering, April, pg 407-414, 2000). Insight, 2000. 42(7): p. 436-438.

# Entwicklung von Wärmedämmsystemkomponenten und -oberflächen auf der Basis nanostrukturierter Materialien

NANO-LAMBDA

Jochen Manara, Mariacarla Arduini

*Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.*

T. Kaup, M. Boos

*Remmers Baustofftechnik GmbH*

## 1 Zielsetzung

Ziel dieses Vorhabens war die Erforschung und Formulierung neuartiger Komponenten für Wärmedämmsysteme auf der Basis nanostrukturierter Materialien. Dabei sollten gezielt physikalische Effekte ausgenutzt werden, die auf dem nanoskaligen Aufbau der eingesetzten Materialien beruhen, um die Leistungsfähigkeit von Wärmedämmstoffen und deren Oberflächen für den Einsatz im Bauwesen zu erhöhen.

Ein wesentlicher Beitrag des Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland fällt auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser (31,1 % für das Jahr 2007). Dabei benötigt der Gebäudebestand, welcher vor der 1. Wärmeschutzverordnung errichtet worden ist und mit 85 % einen überwiegenden Anteil der vorhandenen Bausubstanz darstellt, 95 % des Gesamtheizwärmebedarfs. Hier ist also ein enormes Energieeinsparpotenzial vorhanden, welches sich durch effiziente Wärmedämmungen erschließen lässt. Die energetische Sanierung des Gebäudebestandes kann demnach entscheidend dazu beitragen, die bundesweiten Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren und damit helfen, die deutschen Verpflichtungen zum Klimaschutz zu erfüllen. Analysen zeigen, dass durch verbesserte Wärmedämmung und Solarthermie-Einsatz der Heizenergiebedarf im Gebäudebestand um 60 % reduziert werden könnte.

Neben der Energieeinsparung gibt es zusätzliche Anreize für eine energetische Sanierung des Gebäudebestandes: Der Wohnkomfort und die Behaglichkeit werden erhöht und die Bauwirtschaft erhält wichtige Impulse, wodurch neue Arbeitsplätze gerade bei den in der Regel mittelständischen Bauunternehmen entstehen können. Schließlich ist ein weiterer entscheidender Aspekt einer hohen Energieeffizienz im Gebäudebereich der schonende verantwortliche Umgang mit den vorhandenen Erdöl- und Erdgasvorkommen. Damit stellt das Vorhaben einen Beitrag zur Schonung der knapp werdenden fossilen Brennstoffe dar.

Betrachtet man die derzeit pro Jahr sanierte Gebäudefläche von rund 80 Millionen m<sup>2</sup> und den Marktanteil von 36 % der Polystyrol-Schaumdämmstoffe (30 % EPS - Expandiertes Polystyrol, 6 % XPS – Extrudiertes Polystyrol) am Dämmstoffmarkt (Mineralwolle hat einen Anteil von 55 % in diesem Sektor), so wird das enorme zusätzliche Energieeinsparpotenzial ersichtlich, wenn es gelingt die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren und gleichzeitig die jährlich sanierte Gebäudefläche, wie prognostiziert, auf 135 Millionen m<sup>2</sup> im Jahr 2020 zu steigern.

Im Rahmen des Projekts wurden die Wärmeleitfähigkeiten von Polystyrol-Schaumdämmstoffen minimiert. Eine signifikante Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Wärmedämmstoffen führt jedoch zu einem verstärkten Tauwasserausfall an der Wandoberfläche der Außenseite. Da vor allem bei sehr gut gedämmten Fassaden die Oberflächentemperatur aufgrund der Wärmeabstrahlung an die Umgebung und speziell an den kalten Nachthimmel unter die Lufttemperatur sinken kann, fällt häufig Tauwasser an der Fassadenoberfläche aus. Dies bewirkt langfristig, hauptsächlich bei Wärmedämmverbundsystemen, eine Veralgung bzw. Vergrünung der Fassade, was zum einen den optischen Eindruck verschlechtert und zum anderen die Bausubstanz langfristig schädigt. Bisher werden vor allem Biozide (im Wesentlichen Algizide und Fungizide, aber auch Herbizide) eingesetzt,

um das Algen- und Pilzwachstum im Fassadenbereich zu verhindern. Da Biozide aber auch eine gewisse toxische Wirkung auf den Menschen und andere Organismen haben, sollte die Ausrüstung von Fassaden mit Bioziden nach Möglichkeit vermindert bzw. möglichst unterbunden werden. Durch eine niedrigemittierende Oberfläche wird in einem solchen Fall die Wärmeabstrahlung an die Umgebung reduziert und dadurch die Abkühlung der Oberfläche vermindert, was wiederum zu einer Reduktion des Tauwasserausfalls führt.

Ergänzend wurden daher low-e Beschichtungen zur Optimierung der Oberflächen von gut gedämmten Gebäuden entwickelt. Im Folgenden wird speziell auf diese low-e Beschichtungen eingegangen.

Die Verwendung hocheffizienter Dämmstoffe, die den Wärmetransport durch die Gebäudehülle signifikant reduzieren, verlangt nach Lösungen zur Verbesserung der Tauwasserproblematik an sehr gut gedämmten Wandoberflächen.

Durch Wärmeabstrahlung, speziell an den kalten Nachthimmel, kann sich die Oberflächentemperatur der Außenseite der Außenwand unter die Lufttemperatur abkühlen. Dies tritt vor allem bei gut gedämmten Gebäuden auf. Die Anbringung einer low-e Beschichtung kann eine Taupunktunterschreitung jedoch deutlich vermindern und damit den Tauwasserausfall erheblich reduzieren. Dadurch wird auch die Veralgung der Fassade verringert, da die Algen nur bei Tauwasserausfall wachsen können.

Bei einem Wärmedurchlasskoeffizienten  $\lambda$  von  $0,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  ergeben sich für ein Testreferenzjahr von Würzburg im November die in Bild 1 gezeigten Oberflächentemperaturen  $T_1$  der Außenseite der Außenwand für einen Emissionsgrad von 0,9 bzw. 0,5. Die Lufttemperatur  $T_0$  und die Taupunkttemperatur  $T_P$  sind zum Vergleich mit angegeben. Man erkennt eine Erhöhung der Wandoberflächentemperatur  $T_1$  von ca. 1 K bei einer Absenkung des Emissionsgrades von 0,9 auf 0,5.

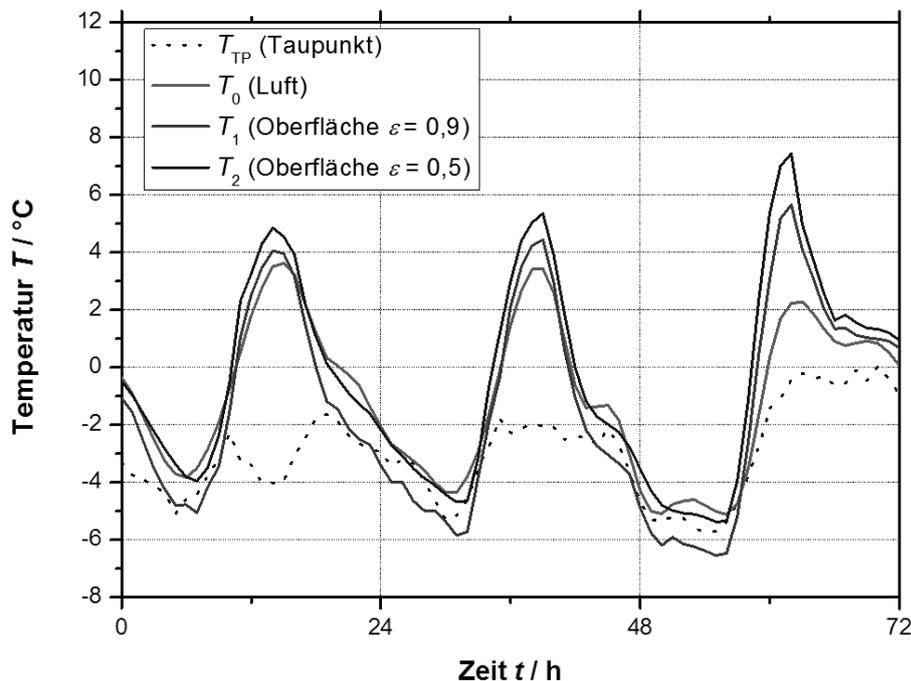


Bild 1: Temperaturverläufe  $T_1$  der Außenseite einer Nordwand während einiger Tage im November für zwei unterschiedliche Emissionsgrade der Außenseite der Nordwand. Die Lufttemperatur  $T_0$  und die Taupunkttemperatur  $T_P$  sind ebenfalls eingezeichnet.

Aus den Jahresverläufen der Oberflächentemperaturen lässt sich die Menge des Tauwassers, das in einem Jahr an der Oberfläche ausfällt ebenso berechnen, wie die Zeitdauer, in der die Wand feucht ist. Die Ergebnisse sind für verschiedene Wandaufbauten und Emissionsgrade in Bild 2 dargestellt. Hier wird zunächst die Wärmekapazität der äußeren Schicht eines Wärmedämmverbundsystem (WDVS) durch Variation der Dicke  $d$  der Putzschicht verändert, wobei der Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,9$  gleich gehalten wird.

Je größer die Dicke der Putzschicht ist, desto höher wird dessen Wärmekapazität und desto geringer wird der Tauwasserausfall. Dieser Effekt ist jedoch deutlich geringer, als beim Einsatz einer low-e Beschichtung mit einem niedrigen Emissionsgrad. Deshalb wurde auch der Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Wandoberfläche variiert, wobei die Dicke der Putzschicht mit  $d = 6$  mm gleich gehalten wurde. Es ist ersichtlich, dass bei einer Verringerung des Emissionsgrades von 0,9 auf 0,7 bzw. 0,5 und 0,3 eine zunehmende Reduktion des Tauwasserausfalls auftritt. Mit einem Emissionsgrad von unter 0,3 kann der Tauwasserausfall nahezu verhindert werden.

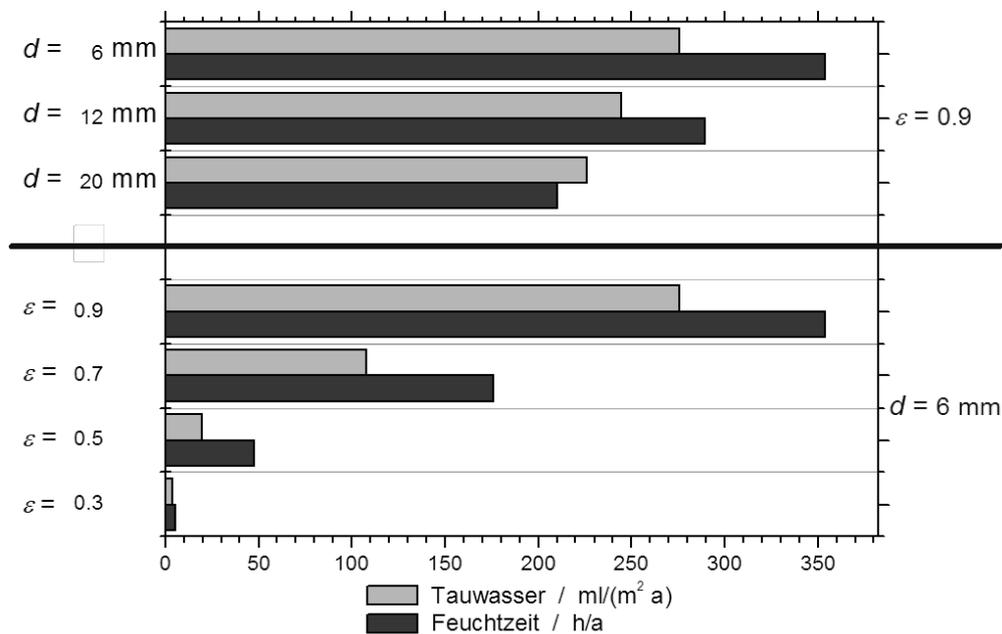


Bild 2: Ausfall von Tauwasser für verschiedene Wandaufbauten. Angegeben sind die jährlichen Tauwassermengen (hellgraue Balken) und die jährliche Feuchtzeit (schwarze Balken). Die deutlichste Reduktion des Tauwasserausfalls erfolgt bei einer Verminderung des Emissionsgrades  $\varepsilon$  (untere Hälfte der Abbildung), während sich die Tauwassermenge bei einer Erhöhung der Putzschichtdicke  $d$  nur geringfügig verringert (obere Hälfte der Abbildung).

## 2 Ergebnisse

Zur Demonstration des geringen Emissionsgrades der low-e Farbe wurde eine Faserzementplatte hälftig mit einer weißen low-e Fassadenfarbe bestrichen. Die verbleibende Hälfte der Faserzementplatte ist mit einer konventionellen weißen Fassadenfarbe versehen. Die Foto-Aufnahme des Demonstrators zeigt keinerlei Unterschied im optischen Farbeindruck der beiden Hälften (vgl. Bild 3 oben links). Über Thermographie-Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera kann das unterschiedliche Abstrahlverhalten der IR-aktiven Oberfläche gegenüber der konventionellen Farbe visualisiert werden (Bild 3).

Die speziellen Eigenschaften der low-e Farben können mit einer Wärmebildkamera anschaulich demonstriert werden. Oberflächen, die einen geringen Emissionsgrad aufweisen und damit wenig Wärme an die Umgebung abstrahlen, besitzen gleichzeitig einen hohen Reflexionsgrad, d. h. sie reflektieren die von außen auftreffende Wärme in die Umgebung zurück.

Auf der linken Hälfte der Platte befindet sich eine konventionelle weiße Wandfarbe, während die rechte Seite mit einer low-e Farbe bestrichen wurde, die optisch kaum von der weißen Wandfarbe zu unterscheiden ist. Die Körperwärme der Hand dient in diesem Fall als Wärmequelle. Die low-e Farbe reflektiert deutlich mehr Wärme als die konventionelle Farbe. Dies erkennt man an der helleren Färbung der Oberfläche im Wärmebild, wenn sich die Hand über der low-e Farbe befindet. Befindet sich die Hand dagegen über der konventionellen Farbe, so ist keine Farbänderung sichtbar, da von der konventionellen Farbe kaum Wärme reflektiert wird.

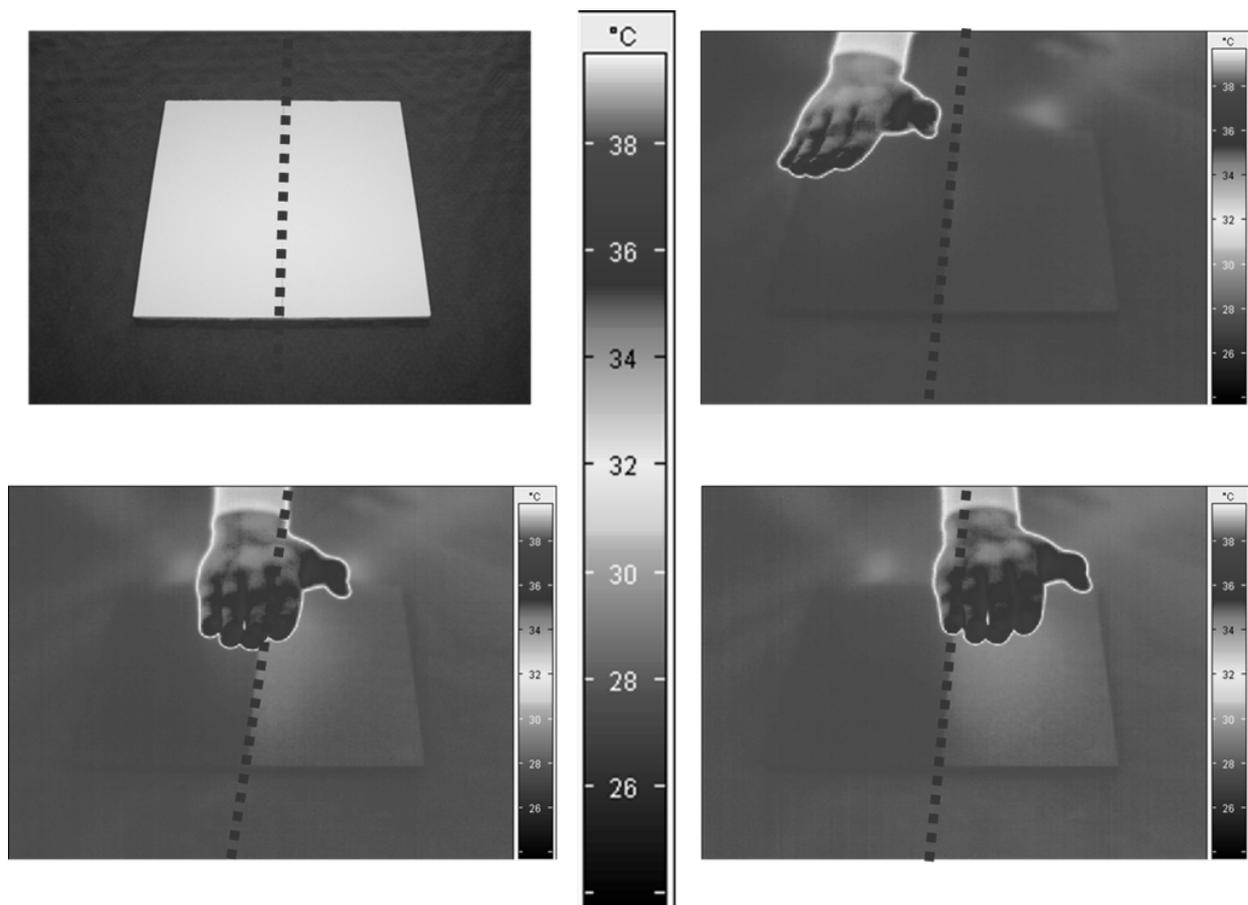


Bild 3: Oben links: Foto des Demonstrators der hälftig mit (rechte Seite) und ohne (linke Seite) low-e Fassadenfarbe bestrichen ist. Die Bilder der Thermokamera visualisieren das unterschiedliche Abstrahlverhalten der IR-Aktiven Oberfläche (rechte Seite des Demonstrators) beim darüber halten einer Hand. Die Körperwärme wird im Falle der low-e Farbe von der Oberfläche reflektiert (heller Bereich im Bild der IR-Kamera). Befindet sich die Hand dagegen über der konventionellen Farbe, so ist keine Farbänderung sichtbar, da von der konventionellen Farbe kaum Wärme reflektiert wird.

# **Herstellung großflächiger, transparenter, witterungsbeständiger Beschichtungen mit integriertem UV-Schutz auf Polycarbonat**

NANOUV

R. Oser, T. Kuhlmann, S. Kostromine  
*Bayer MaterialScience AG*

S. Merli, A. Schulz, M. Walker, T. Hirth  
*Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und  
Plasmatechnologie der Universität Stuttgart*

K.-H. Reuter, M. Jung  
*Reuter Technologie GmbH*

M. Reichmann, K.-M. Baumgärtner  
*Muegge GmbH*

## **1 Zielsetzung**

Glas ist wegen seiner Lichtdurchlässigkeit ein wichtiger Grundstoff der Bauindustrie. Allerdings ist Glas auch spröde, und darüber hinaus ist die Wärmeleitung und Dichte von üblichen Gläsern in etwa so groß wie die von Stein, wodurch sowohl statisch wie dämmtechnisch besondere Lösungen notwendig werden. Transparente Kunststoffe, wie Polycarbonat, haben dieses Problem nicht und sind gerade wegen ihrer extremen Schlagzähigkeit in sicherheitsrelevanten Anwendungen wie transparenten Dachelementen, Verglasungen für Lärmschutzwände, Haftanstalten, Sportstätten, Schulen oder Krankenhäuser sinnvoll einsetzbar.

Allerdings sind die Witterungsbeständigkeit von Polycarbonat und der Kratzschutz dem von Glas unterlegen. Für den Außeneinsatz muss Polycarbonat daher gegen Witterungseinflüsse geschützt werden. Das Gesamtziel des Vorhabens umfasst die Einführung einer Dünnschichttechnologie zur Verbesserung von Polycarbonatbaustoffen für die Architekturverglasung. Die Beschichtung soll sowohl Schutz gegen die UV-Strahlung der Sonne wie auch Schutz gegen Verkratzen bieten. Beide Eigenschaften versucht man heute durch thermisch aushärtende Lacksysteme zu erreichen, wobei der UV-Schutz durch Einbringen von organischen UV-Absorbern gewährleistet wird. Die Kratzfestigkeit ist eine Lackeigenschaft. Diese Technologie stellte für das Projekt gleichzeitig die technische wie auch wirtschaftliche Richtgröße dar. Ziel dieses Projekts war es, eine transparente Beschichtung für Polycarbonat zu erarbeiten, bei der die beiden Eigenschaften UV- und Kratzschutz in einem Plasmaprozess erreicht werden. Dabei sollte der UV-Schutz durch organische UV-Absorber gewährleistet und die Kratzfestigkeit mittels einer glasartigen Plasmapolymerschicht dargestellt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde ein Hochrate-Prozess angestrebt, und da die Anwendung im Architekturbereich liegt, mussten bauübliche Dimensionen beschichtet werden.

Zur Darstellung eines wirtschaftlichen Prozesses für die kratzfeste Beschichtung mit integriertem UV-Schutz auf Polycarbonat waren daher folgende Randbedingungen zwingend erforderlich:

- Großflächige Plasmaquellen als Flächen- oder Linienquellen für die Beschichtung von Substraten der Dimension 0,5 m<sup>2</sup>
- Skalierbarkeit der Plasmaquellen für Zieldimensionen der Anwendung in der Architektur (4-6 m<sup>2</sup>)
- Lineare oder flächige, statische Abscheideraten von mindestens 50 nm/s, um eine Plattenbeschichtung in wenigen Minuten ermöglichen zu können.
- Hochdichte, milde und kalte (nichtthermische) Plasmen, um schonende Abscheidebedingungen für das Substrat und den UV-Absorber, ohne Einbußen in der Abscheiderate, gestalten zu können.
- Serientauglichkeit des Prozesses für Serien von einigen 100 000 Platten pro Jahr
- Homogenität besser 15% (besser als die bestehende Lacktechnologie)

## 2 Arbeitsprogramm

Der Lösungsansatz gliederte sich in zwei gleichbedeutende Teile:

- Hochskalierung eines Hochrate-Beschichtungsprozesses auf der Basis eines Flächenplasmas von der Substratgröße 100 cm<sup>2</sup> auf die Substratgröße 0,5 m<sup>2</sup>. Damit stand ein Verfahren zur Verfügung, das weiter skalierbar ist und mit hoher Beschichtungsrate erstmals auch einen entsprechenden Massenmarkt bedienen kann.
- Einbau von empfindlichen Precursoren, wie sie UV-Absorber darstellen, in die plasmachemische Reaktionsfront eines PECVD-Hochrateprozesses. Dabei wurden Precursor und Prozess so manipuliert, dass die UV-Absorber zu großen Teilen in voller Wirksamkeit in die PECVD-Schicht eingebaut werden konnten. Dazu waren milde Plasmabedingungen nötig, wie sie nur in extrem hochfrequenten Anregungen wie Mikrowellenplasmen realisierbar sind.

## 3 Ergebnisse

Im Projekt wurde eine Kombination aus UV-Schutzschicht und Kratzschutzschicht mittels eines mikrowellenunterstützten Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)-Prozesses auf Polycarbonat abgeschieden und untersucht. Im ersten Schritt wurden die beiden unterschiedlichen Schutzschichten einzeln abgeschieden und analysiert. Als anorganischer UV-Absorber wurde Zinkoxid (ZnO) in einem Mikrowellenniederdruckplasma mit Diethylzink (DEZ) als Precursor und mit Sauerstoff als Arbeitsgas abgeschieden. SiO<sub>x</sub>-basierte Schichten aus Hexamethyldisiloxan (HMDSO) als Precursor und wiederum Sauerstoff als Arbeitsgas stellten sich als hervorragende Kratzschutzschichten heraus. Die Abscheidung der beiden unterschiedlichen Schutzschichten auf 10 cm x 15 cm großen Polycarbonatsubstraten geschah in einem Plasma-Array, bestehend aus vier parallel angeordneten Duo-Plasmalines. Das Plasma-Array wurde mit Mikrowellenleistung von bis zu 2 x 3 kW betrieben. In einem ausgeklügelten Abscheideprozess wurde die UV-Schutzschicht, bestehend aus ZnO, mit der SiO<sub>x</sub>-basierten Kratzschutzschicht kombiniert.

Das Schichtsystem aus UV- und Kratzschutzschicht zeigte eine hohe Transparenz von 90% im sichtbaren Bereich und eine hohe optische Dichte von 3 im UV-Bereich bei der Wellenlänge von 340 nm. Für die Abscheidung der Kratzschutzschicht auf Basis von SiO<sub>x</sub> wurde ein Hochrateplasmaabscheideverfahren im Niederdruck entwickelt, mit dem es möglich ist, Abscheideraten für SiO<sub>x</sub>-Kratzschutzschichten bis zu 60 µm/min zu erzielen. Die so abgeschiedenen Schichten zeigten eine optimale Haftung auf Polycarbonat und wiesen im Taber-Abriebtest nach 1000 Zyklen einen extrem hohen Abriebwiderstand von ΔHaze = 1,5 - 3,4 % auf. Darüber hinaus hielten die kombinierten UV-Kratzschutzschichten den Standard-Bewitterungstests problemlos stand, mit denen die Langzeitbeständigkeit des Schichtsystems in Kombination mit den Polycarbonatensubstraten getestet wurde.

Parallel dazu wurde eine Anlage, basierend auf der Duo-Plasmaline-Technologie und betrieben mit zwei 6 kW-Mikrowellengeneratoren, konzipiert und aufgebaut, mit der es möglich ist, 0,5 m<sup>2</sup> große Polycarbonatplatten mit der kombinierten UV-Kratzschutzschicht zu beschichten.

Projektbeitrag aus der Förderinitiative

## **"KMU-innovativ"**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Funktionalisierte Fasern für zementgebundene Werkstoffe

FUNKTIONALFASER

Dr. Julia Süßmuth, Prof. Dr. Andreas Gerdes  
IONYS AG

## 1 Einleitung

Zementgebundene Werkstoffe finden vielfältige Anwendungen im Bauwesen, die von der Erstellung von Brückenpfeilern über den Bau von Wasserspeichern bis zur Gestaltung von Fassadenoberflächen reichen. Die Funktionen, welche die Werkstoffe in diesen Applikationen übernehmen müssen, unterscheiden sich in einer vergleichbaren Vielfältigkeit. Stehen im ersten Beispiel eher die mechanischen Eigenschaften im Vordergrund, wird bei der Speicherung des Wassers die sehr geringe Biorezeptivität des Werkstoffes genutzt. Als Fassadenbaustoff übernimmt der zementgebundene Werkstoff eine bauwerksschützende und eine ästhetische Funktion. Daraus leiten sich auch direkt die vielfältigen Anforderungsprofile an zementgebundene Werkstoffe ab. Eine besondere Rolle spielen dabei die mechanischen Eigenschaften, d. h. eine sehr hohe Druckfestigkeit und eine deutlich niedrigere Zugfestigkeit. Gerade die geringe Duktilität des zementgebundenen Werkstoffes führt in der Praxis zu einem frühzeitigen Versagen des Werkstoffes, was technologisch, ökologisch und ökonomisch aufwendige Instandsetzungen nach sich zieht.

Die Beanspruchungen und daraus ableitend auch die Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe werden sich zukünftig durch Megatrends wie dem Klimawandel verändern. Die Abbildung 1 zeigt den bisherigen Temperaturverlauf in diesem Jahr 2015 [1]. Der schattierte Bereich kennzeichnet den üblicherweise von den Produktherstellern angegebenen Temperaturbereich, in dem zementgebundene Werkstoffsysteme (z. B. Werk trockenmörtel) verarbeitet werden dürfen. Deutlich erkennbar ist, dass in diesem Jahr, besonders während der Sommermonate, eine Applikation häufig nicht zulässig war. Dies würde aber zu Störungen im Bauablauf mit den entsprechenden wirtschaftlichen Folgen führen. Führt man aber die Bauarbeiten trotzdem durch, z. B. das Verputzen einer Fassade, ist das Risiko für eine schwindbedingte Rissbildung vergleichsweise hoch. Eine einfache Lösung für die Verantwortlichen scheint es hier nicht zu geben.

Auch in den nächsten Jahren ist mit einem Trend zu heißeren Sommern zu rechnen. Eine Anpassung der Werkstoffsysteme an die sich verändernden Klimabedingungen wird aber nur eine Herausforderung sein, vor der die Baustoffindustrie steht. Auch weitere Megatrends, wie Energie und Ressourcenverknappung, beeinflussen das Bauwesen entlang der Wertschöpfungskette bereits nachhaltig [2].

## 2 Forschungsansatz

Die geringe Zugfestigkeit zementgebundener Werkstoff hat schon sehr früh zur Herstellung von Verbundwerkstoffen geführt, d. h. der Kombination verschiedener Ausgangswerkstoffe zur Erzielung anderer Werkstoffeigenschaften im Vergleich zu den Ausgangsstoffen. So werden die meisten Betonbauteile mit Stahlbewehrungen versehen, um das mechanische Tragverhalten deutlich zu verbessern. Es gibt aber auch Applikationen, bei denen durch Austrocknung (Schwinden) oder Temperaturgradienten bedingt bereits wenige Stunden nach der Herstellung eine Rissbildung auftreten kann.

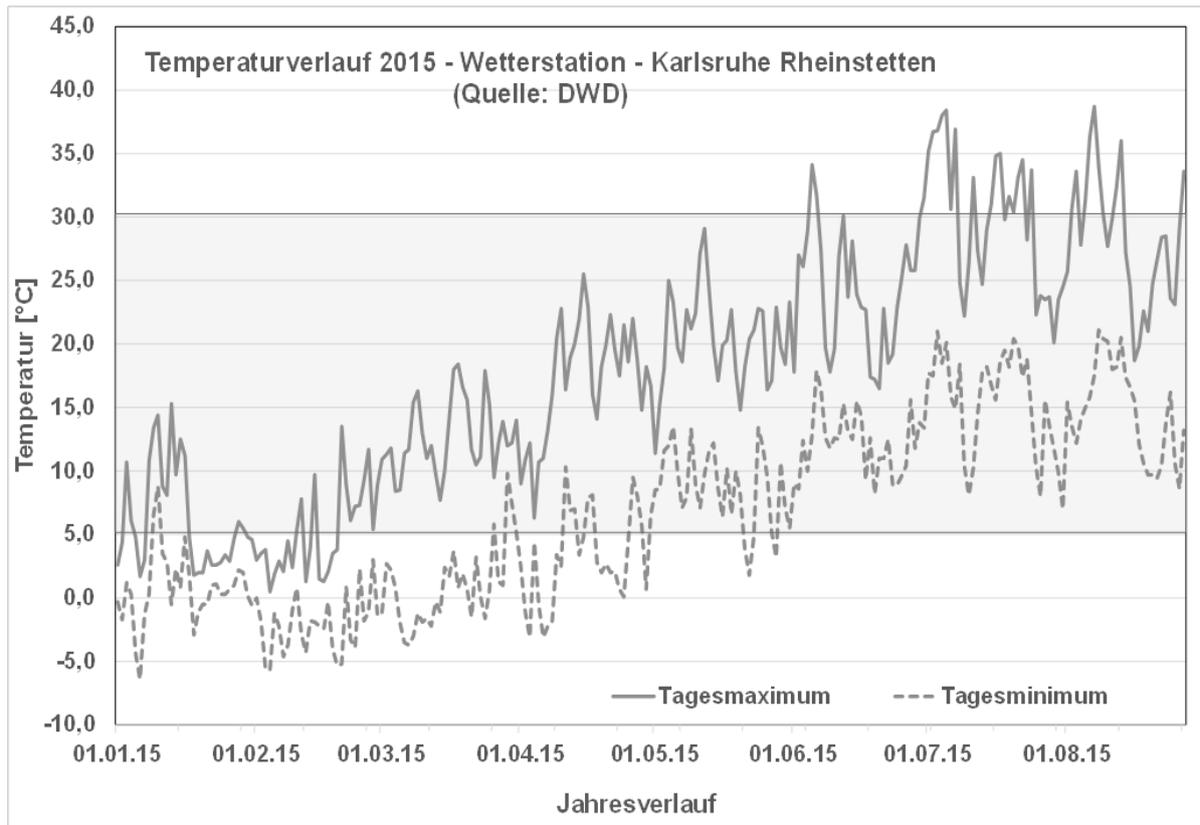


Bild 1: Bisheriger Temperaturverlauf im Jahr 2015 – Tagesmaximum und Tagesminimum (Quelle: DWD)

Fig. 1: Previous temperature history in 2015 - daily maximum and daily minimum (Source: DWD)

Auch Hochleistungsbetone weisen gerade wegen der hohen Festigkeit ein unerwünschtes Bruchverhalten auf, da sie im Vergleich zu niederfesten Betonen weniger duktil sind. Bei einer lokalen Überbelastung entstehen aus Mikrorissen schnell größere Risse, die ein Versagen des Bauteils mit Gefahren für Leib und Leben als Folge nach sich ziehen. Dies schränkt die Anwendbarkeit dieser Betonsorten deutlich ein.

Um die Einsatzfähigkeit zementgebundener Werkstoffe beizubehalten (Stichwort: Klimawandel) bzw. zu erweitern (Stichwort: „schlanke Bauteile mit UHPC“) werden diesen heute Fasern zugemischt, neben Stahlfasern vor allem Fasern auf Basis von Polyethylen, Polypropylen, Polyacrylnitril (PAN) und Polyvinylalkohol (PVA) sowie Carbon-Fasern und aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit neuerdings sogar Carbon Nano Tubes (CNT) [3]. Praktisch basiert die Wirkung der Faser auf einer Dissipation der Bruchenergie, bedingt durch die Haftreibung zwischen hydrophober Polymerfaser und der hydrophilen Zementsteinmatrix [4]. Durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften – hydrophob und hydrophil – ist aber eine chemische Anbindung zwischen Faser und Zementstein nicht gegeben. Durch die rein physikalische Wechselwirkung ist für eine gewünschte Faserwirkung eine gewisse Fasermenge und –länge vorauszusetzen, was bei geringen Bauteilabmessungen (z.B. Putz) oder hohen Anforderungen an die Festigkeit (z.B. UHPC) zu technisch relevanten Einschränkungen, bspw. in der Verarbeitbarkeit führt. Zur Vermeidung dieser Problematik werden Fasern benötigt, die auch bei geringer Länge und Gehalt in der Lage sind, Zugkräfte aufzunehmen. Das kann durch eine chemisch-physikalische Anbindung der Fasern an die Zementsteinmatrix erreicht werden. Dazu ist bei Polymerfasern, mit oder ohne endständige funktionelle Gruppen eine Oberflächenmodifikation notwendig, die durch mit dafür formulierten chemischen Verbindungen erreicht werden kann.

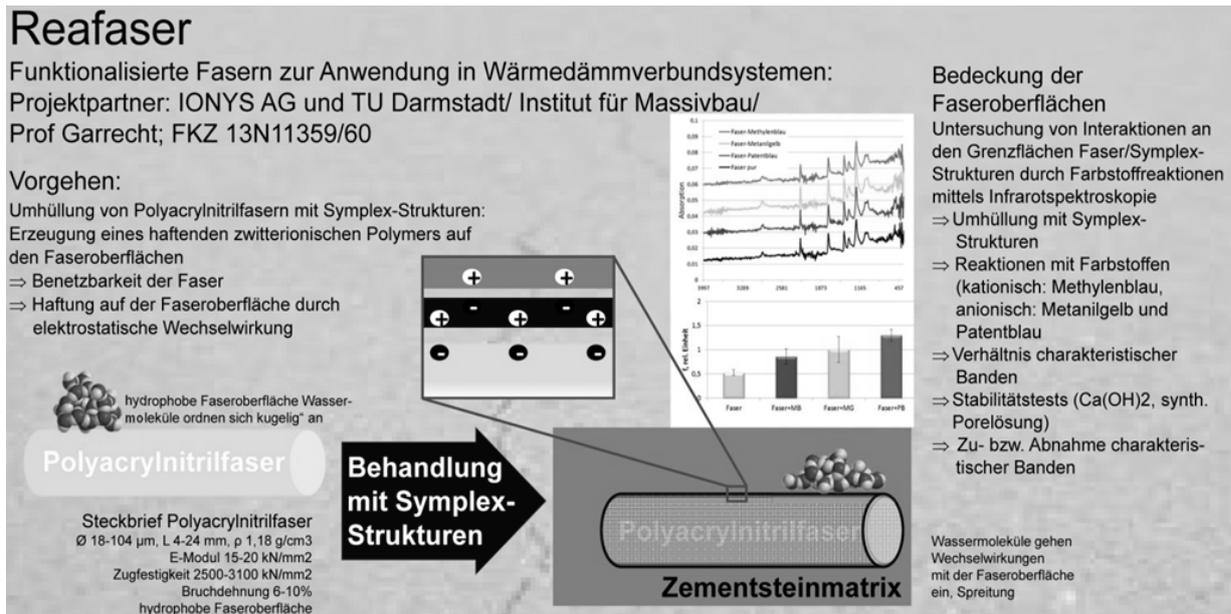


Bild 2: Projekt „Reafaser“ – Funktionalisierung von Polyacrylnitrilfasern

Fig. 2: Project "Reafaser" – Functionalization of fibers made by polyacrylonitrile

### 3 Forschungsprojekt „Reafaser“ – Forschungsergebnisse

In einem ersten Forschungsprojekt (KMUinnovativ, FKZ 13N11359/60: „ReaFaser - Entwicklung funktionalisierter Fasern zur Anwendung in Wärmedämmverbundsystemen“) wurde in Zusammenarbeit mit Prof. H. Garrecht (TU Darmstadt bzw. TU Stuttgart) eine Schichte für Fasern auf Basis von Polyacrylnitril entwickelt. Bei dem von der IONYS AG entwickelten Ansatz wurden Polymere entwickelt, welche über polarisierte Ladungsdomänen direkt an die Faseroberfläche „angelagert“ werden sollte, während andere Teile dieser polymeren Verbindungen als solche fest an der Matrix verankert wird.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten führten zur Entwicklung einer sogenannten Symplexstruktur, die als „Schichte“ auf die Faseroberfläche aufzieht und dort durch elektrostatische Wechselwirkungen fixiert wird. Dass die Interaktionen zwischen der entwickelten Komponente und der PAN-Faser zu einer festen Bindung zwischen beiden Komponenten führt, konnte durch eine eigens entwickelte Färbemethoden nachgewiesen werden. Von hohem Interesse war die Alkalistabilität der „Schichte“, da bekanntermaßen in einem zementgebundenen Werkstoff pH-Werte von über 13 vorliegen können. IR-spektroskopische Untersuchungen zeigten, dass ein chemischer Abbau der Schichte auch bei sehr hohen pH-Werten nicht stattfindet.

Ein Schwerpunkt bei den Untersuchungen zur Wirkung der Fasern auf das mechanische Verhalten der so modifizierten Mörtel. Da sie entwickelt wurden, um das Schwindverhalten dünn-schichtig aufgetragener Mörtelsysteme zu verbessern, wurde auch die Längenänderung bei Mörteln mit Zusätzen von mit der Symplexstruktur modifizierten PAN-Fasern untersucht. Die Untersuchungsergebnisse zur Längen- und Massenänderung prismatischer Proben bestätigten den positiven Einfluss der Fasermodifizierung mittels Symplex-Molekülen. Putzmörtelserien unter Verwendung oberflächenbehandelter Fasern weisen im Vergleich zu Putzmörteln mit unbehandelten Fasern ein signifikant geringeres Schwindverhalten auf [5].

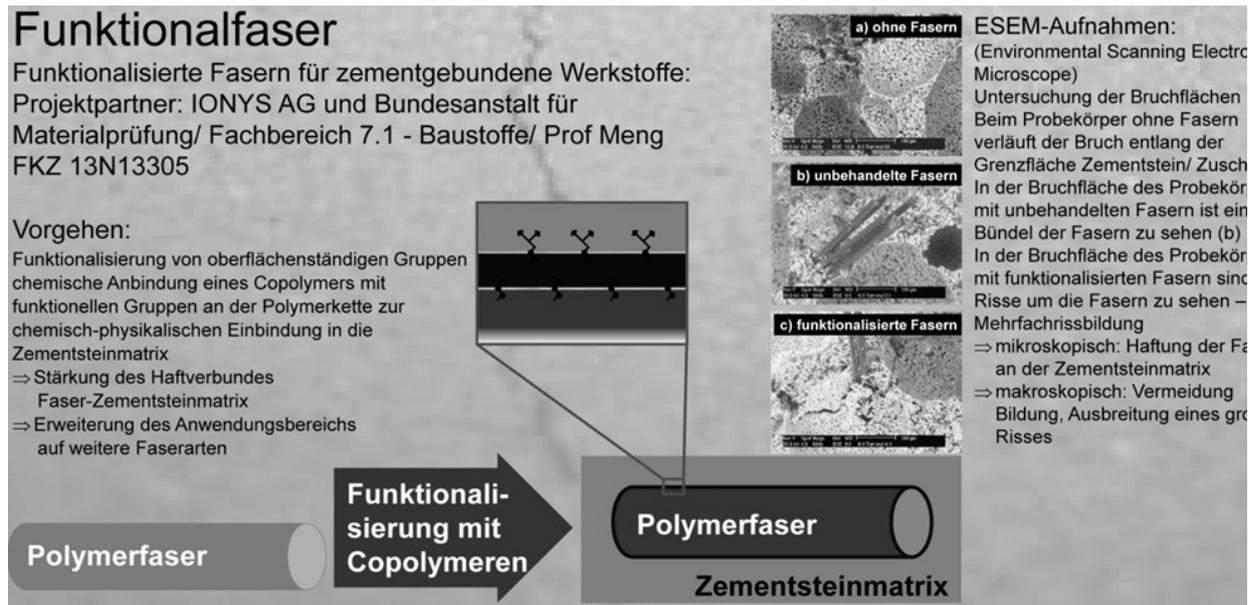


Bild 3: Projekt „Funktionalfaser“ – Funktionalisierung von Polymerfasern

Fig. 3: Project "Funktionalfaser" – Functionalization of polymer fibers

#### 4 Forschungsprojekt „Funktionalfaser“ – Forschungsergebnisse

Je nach Anwendung der Fasern, d. h. als Komponente bei einem Werk trockenmörtel oder bei einem hochfesten Beton, unterscheiden sich diese auch in ihren mechanischen Eigenschaften. Eine wichtige Werkstoffkenngröße ist dabei das E-Modul der Fasern. Während eine Faser auf Polyacrylnitrilbasis (PAN) eher ein niedriges E-Modul aufzeigt, zeichnen sich Carbonfasern durch ein sehr hohes E-Modul aus. Letztere weisen, wie auch die PVA-Fasern, aber keine endständigen funktionellen Gruppen auf, so dass der im Projekt „Reafaser“ entwickelte Ansatz hier nicht funktioniert.

Für neue Anwendungen bzw. die Erweiterung bestehender Applikationen ist es daher notwendig, das Prinzip „funktionelle Schlichte“ in eine Anbindung auf Basis starker chemischer kovalenter Bindungen zur Steigerung der mechanischen Performance des Verbunds zu überführen, wobei diese Technologie auf die verschiedenen, für die Faserherstellung verwendeten Polymere erweitert werden muss, um so ein breites Einsatzspektrum zu ermöglichen.

Durch die verstärkte Anbindung der Faser über die funktionalisierte Oberfläche an die Zementsteinmatrix werden die mechanischen Eigenschaften des Verbundsystems signifikant gesteigert. Darum werden in diesem Projekt, basierend auf eigens dafür erarbeitete wissenschaftlichen chemischen Grundlagen, spezielle Copolymere entwickelt, welche eine chemische Anbindung funktioneller Beschichtungen an Faseroberflächen aus verschiedenen Polymertypen (z.B. Polyvinylalkohol, Carbon-Fasern) erlauben. Die Bindungsstärke kann durch die Variierung der Zusammensetzung des Copolymers dabei in einer gewissen Bandbreite eingestellt werden („tunable materials“).

Die ersten Copolymere sind bereits synthetisiert, die Untersuchungen zum Verbundverhalten in einer Zementsteinmatrix werden gerade bei der BAM in Berlin durchgeführt.

## 5 Schlussfolgerungen

Aus den obigen Ausführungen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Megatrends, wie Klimawandel, Energie und Ressourcenverknappung, werden zunehmend das Bauen im Allgemeinen und die Herstellung zementgebundener Werkstoffe beeinflussen.
- Zur Anpassung der zementgebundenen Werkstoffe an veränderte Umweltbedingungen wird es zukünftig vermehrt notwendig sein, diese mit Hilfe von Polymerfasern zu modifizieren.
- Voraussetzung für einen breiteren Einsatz der Fasern ist deren stärkere Anbindung an die mineralische Phase.
- Neuentwickelte Copolymere können dazu beitragen durch eine elektrostatische bzw. chemische Bindung an die mineralische Matrix die Menge und Länge der zuzusetzenden Fasern zu reduzieren, was aufgrund der damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Vorteilen einen breiteren Einsatz ermöglichen wird.

## 6 Literatur

- /1/ Die Wetterdaten wurden der öffentlich zugänglichen Datenbank (<http://www.dwd.de/WESTE>) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen
- /2/ Matthias Horx: Das Megatrend-Prinzip – wie die Welt von morgen entsteht, Pantheon-Verlag, München (2014)
- /3/ A. Sobolkina, V. Mechtcherine, C. Bellmann, A. Leonhardt: Investigation of the surface properties of carbon nanotubes, Fachgruppe Bauchemie, GDCh (Hrsg.), 1<sup>st</sup> International Conference on the Chemistry of Construction Materials, Berlin 157-160 (2013)
- /4/ A.K.Mohanty, L.T. Drzal, M. Misra: Engineered natural fiber reinforced polypropylene composites: influence of surface modifications and novel powder impregnation processing, J. Adhes. Sci. Technol. 16 999–1015 (2002)
- /5/ H. Garrecht und Viktória Malárics-Pfaff: Funktionalisierte Fasern zur Anwendung in Wärmedämmverbundsystemen, Teilvorhaben: Experimentelle und numerische Charakterisierung des Verbundwerkstoffverhaltens, Abschlussbericht des KMUinnovativ-Projektes : „ReaFaser - Entwicklung funktionalisierter Fasern zur Anwendung in Wärmedämmverbundsystemen“ (FKZ 13N11359/60), TU Darmstadt (2013)

*zusammengestellt im Rahmen  
des Transferprojekts WiTraBau*



*[www.hightechmatbau.de](http://www.hightechmatbau.de)*