HighTech MatBau

NEUE MATERIALIEN IM BAUWESEN

Tagungsband mit Beiträgen zur Konferenz vom 31. Januar 2018 in Berlin

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

HighTech MatBau
Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen

Fraunhofer IRB Verlag

Beiträge der

Konferenz für Neue Materialien im Bauwesen

am 31. Januar 2018 in Berlin

Beiträge der

Konferenz für Neue Materialien im Bauwesen

am 31. Januar 2018 in Berlin

Fraunhofer IRB Verlag

Liane Horst

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

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Vorwort

Bauforschung stärken heißt Infrastruktur verbessern!

Mit dem Schwerpunkt »HighTechMatBau – Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen« fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit 2014 die Entwicklung neuer Materialien im Bauwesen. Noch ist das Projektende vieler Vorhaben nicht erreicht, doch bereits jetzt konnte ich mich persönlich davon überzeugen, dass sich beeindruckende Ergebnisse abzeichnen, die das Bauen und Leben in naher Zukunft positiv beeinflussen werden.

Mit rund zwei Mio. Beschäftigten und einem realen Bauvolumen im dreistelligen Milliardenbereich ist das Baugewerbe einer der wichtigsten Wirtschaftszweige Deutschlands. Wachsende Baunachfrage bei steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Energieeffizienz erfordert neue und verbesserte Baustoffe und Materialien! Innovationen beim Bauen sind auch heute noch möglich und mehr denn je nötig. Dieser Förderschwerpunkt des Programms »Vom Material zur Innovation« zielt darauf, als Schlüsseltechnologie Lösungsbeiträge zu den globalen Herausforderungen zu leisten. Er knüpft damit an den Erfolg der vorangegangenen BMBF-Förderung »Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture« an.

Besonders freue ich mich über die zum Teil interdisziplinär aufgestellten Konsortien, die gemeinsam Lösungen erarbeiten und so neue innovative Wege einschlagen konnten.

Mit der Konferenz für neue Materialien im Bauwesen, die am 31. Januar 2018 in dem historisch und architektonisch außergewöhnlichen Veranstaltungsort bcc in Berlin stattfindet, werden die Projektergebnisse im Rahmen von Fachvorträgen vorgestellt. Ich kann alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer nur ermutigen, bei den zahlreich ausgestellten Demonstratoren selbst Hand anzulegen und sich ebenfalls von den Ideen und neuen Möglichkeiten im Baubereich beeindrucken zu lassen.

Die Veranstaltung wird im Rahmen des wissenschaftlichen Begleitprojektes »Wissenstransfer im Bauwesen (WiTraBau)« ausgerichtet. Das Ziel des Begleitprojektes besteht in der Unterstützung beim Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis. Die Konferenz ist ein wesentlicher Aspekt dieses Transfers. Das WiTraBau-Konsortium hat sich ins Zeug gelegt, Ihnen einen interessanten und angenehmen Tag mit anregenden Diskussionen und vielen neuen Ideen zu bieten.

Hierbei wünsche ich Ihnen vielversprechende Einblicke, die Ihre Praxis und/oder Ihre Entwicklungen in neue Bahnen lenken können. Ich werde die Projekte mit großem Interesse weiter begleiten und beobachten.

Inhaltsverzeichnis

WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen 1
Kenji Reichling, Udo Wiens

AeroBasalt – Erforschung eines energieeffizienten, ultraleichten, recycelbaren Faserverbundwerkstoffes aus Basaltfasern und Silikat-Aerogelen 7
Thilo Becker, Lars Appel, Thomas Gries, Gerald Grübler, Michael Hitz, Robert Buhmann

Aeroputz – Aerogele in der Anwendung für mineralische Hochleistungswärmedämmputze 11
Christoph Dworatzyk, Andreas Sengespeick, Nils Mölders

CFC-SYS – CFK-vorgespannte Fußgängerbrücken aus Carbonbeton in Systembauweise 15
Sophia Perse, Norbert Will, Josef Hegger

EcoSphere – Mikro-Hohlglaskugeln als Basis energieeffizienter Dämmung von Gebäuden 21
Sebastian Lehmann, Laura Schwinger, Benedikt Scharfe, Thorsten Gerdes, Markus Ehrhardt, Christin Riechert, Hans-Bertram Fischer, Achim Schmidt-Rodenkirchen, Friedbert Scharfe, Friedrich Wolff

ECWin2.0 – Smart Windows der 2. Generation 27

Funktionalfaser – Funktionalisierung von Polymerfasern 31
Natalia Rachmatulin, André Gardei, Julia v. Werder, Birgit Meng, Julia Süßmuth, Andreas Gerdes, Detlef Ballschuh, Horst Seibt

HESTER – Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe 37
Stephan Villaret, Tanja Tschernack

INNO-PAVE – Grundlegende Erforschung polymerer Werkstoffe sowie innovativer Herstellungs- und Einbautechnologien für Straßendeckschichtsysteme 43
Markus Oeser, Sabine Faßbender, Daniel Hilpert

MultiLC – Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften 49
Claudia Lösch, Dietmar Stephan, Mike Schlaich, Frank U. Vogdt

NaHiTAs – Nachhaltiger HighTech-Asphalt 55
Sandra Weigel, Alexander Babiak, Dietmar Stephan, Sebastian Czaja

NAPOS – Nanoporöser druckfester Porenbetonstein 61
A. Stumm, M. Achternbosch, E. Nieke, P. Stemmermann, U. Schweike

PureBau – Untersuchung von Werkstoffsystemen für photokatalytisch hocheffiziente Baustoffe 67
Thomas Koch, Horst Purwin

R-Beton – es geht viel mehr! 73
Julia Scheidt, Wolfgang Breit, Raymund Böing

Schwelle 2020 – Biblock-Bahnschwellen aus Kunststoff-Rezyklaten 79
Gerhard Linde, Dieter Kästingschäfer, Reinhard Lorenz, Jörg Frenzel, Gudrun Gräbe, Michael Dieterle, Andreas Stolzenberg

SEDA – Untersuchung multifunktionaler Straßenbaumaterialien und Verbundwerkstoffe zur Nutzung solarer Energie und Verbesserung der Dauerhaftigkeit 83
Manuel Nullmeyer, Sebastian Pinnau, Markus Clauß

SMART-DECK – Multifunktionales Schutz- und Verstärkungssystem für Brückenbauwerke 89
Till Büttner, Viviane Adam, Carla Driessen, Michael Raupach

SULFOAM – Neue Dämm- und Verfüllstoffe aus Schaumgips 95
A. Hübner, H. Dreuse, S. Nowak

THELMA – Thermisch wirksame Bauelemente für das Mauerwerk 99
Michael Haist, Viktória Malárics-Pfaff, Jan P. Höffgen, Frank Schilling, Harald S. Müller, Alexander Jurecka, Hubert Fritschi, Markus Hauer, Katharina Rupp, Franz-Josef Strauß, Johannes Fuchs

WiTraBau

HighTech MatBau

WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen

Wissenschaftliches Begleitvorhaben zur Unterstützung der Verwertung

Kenji Reichling, Udo Wiens, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Kurzfassung: Sieben Partner aus den Bereichen Forschung, Industrie und Regelwerksetzung haben sich zusammengeschlossen, um den Transfer neuer innovativer Werkstoffe vom Labor in die Praxis zu beschleunigen. Im Rahmen des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »WiTraBau« wird die Verwertung der Forschungsergebnisse aus den parallel laufenden Projekten der Bekanntmachung »HighTechMatBau – Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen« und »KMU-innovativ« sowie aus den bereits abgeschlossenen Projekten aus »NanoTecture – Nanotechnologie im Bauwesen« begleitet. In beiden Bekanntmachungen werden Projekte gefördert, in denen neue innovative Werkstoffe und Materialien im Bauwesen entwickelt werden.
In einem ersten Schritt wurde ein Konzept erarbeitet, um auf Basis einer Vielzahl individueller Forschungsberichte eine Verwertungsstrategie ableiten zu können. Die Umsetzung der Strategie wird durch die Verbundpartner unterstützt, wobei die einzelnen Aktivitäten in einer zentralen Datenbank dokumentiert werden. Die Auswertung der Daten ermöglicht eine Einschätzung des Verwertungserfolges sowie eine zielgerichtete Anpassung weiterer Verwertungsaktivitäten.

Stichworte: Werkstoffe, Verwertung, Regelwerke, Kommunikation, Transfer

1 Einleitung

Seit Dezember 2014 fördert das BMBF das Begleitprojekt »WiTraBau – Wissenstransfer im Bauwesen« (siehe auch www.hightechmatbau.de). Das Projektkonsortium besteht aus folgenden Partnern:

- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb, Koordinator),
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV),
- Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB),
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV),
- Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB),
- Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) und
- VDZ gGmbH (VDZ).

Das Ziel besteht darin, die forschenden Stellen bei der Entwicklung von Verwertungsstrategien sowie bei deren Umsetzung zu beraten und zu unterstützen. Das Projekt fokussiert sich hierbei auf die Projekte aus den BMBF-Bekanntmachungen:

- HighTechMatBau – Neue Werkstoffe für urbane Infrastrukturen,
- NanoTecture – Nanotechnologie im Bauwesen und
- KMU-innovativ (nur die baustoffspezifischen Projekte).

Da die Ergebnisse aus der abgeschlossenen Bekanntmachung »NanoTecture« bereits vorliegen, fanden dort die ersten Verwertungsaktivitäten statt. Die Forschungsprojekte aus der Bekanntmachung »HighTechMatBau« laufen zeitlich parallel zum vorliegenden Begleitprojekt, so dass die Projekte während der gesamten Projektlaufzeit unterstützt werden können.

2 Vorgehensweise

Eine wesentliche Aufgabe besteht in der Beratung hinsichtlich der Entwicklung und Initiierung von Verwertungsstrategien. Als Basis dienen die bisher

erreichten und noch zu erwartenden Ergebnisse. Bisher wurden folgende Maßnahmen zur Beschleunigung des Technologietransfers verfolgt:

- Begleitung im Verwertungsprozess (Identifikation von Ergebnissen zur Verwertung, Aufbau einer Verwertungsstrategie, Ableitung von Verwertungsaktivitäten),
- Adressatengerechte Veröffentlichung der Ergebnisse (z. B. Veröffentlichungen, Vorträge, Gremiendokumente),
- Beratung der Verwertungsmöglichkeiten in Fachgremien,
- Einbringen geeigneter Ergebnisse in Regelwerke (o. ä.),
- Ausrichten von Informationsveranstaltungen (Tagungen, Themenkolloquien).

Für die Umsetzung der Verwertungsstrategien werden die weitreichenden Netzwerke der WiTraBau-Partner genutzt. Jedem Forschungsprojekt wurde entsprechend der fachlichen Kompetenzen ein WiTraBau-Ansprechpartner zugeordnet. Um den Marktzugang der bereits abgeschlossenen Projekte aus »NanoTecture« zu beschleunigen, wurde zunächst ein Evaluierungskonzept erarbeitet. Das Konzept sieht vor, dass die verwertbaren Projektergebnisse zunächst identifiziert und mit einer Kurzbeschreibung dokumentiert werden. Hierzu wurde ein wissenschaftlich fundiertes Expertensystem entwickelt, über das Ergebnisse online erfasst und in einer Datenbank gespeichert werden. Das Expertensystem fußt auf Auswertungen der Abschlussberichte und Interviews mit den jeweiligen Projektkoordinatoren der einzelnen Verbundforschungsprojekte.

Tabelle 1 Für die Zuordnung der identifizierten Ergebnisse entwickelten Erkenntnisstufen

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

Gemeinsam in WiTraBau entwickelte Erkenntnisstufen (siehe Tabelle 1) und Verwertungsoptionen (siehe Tabelle 2) erleichtern die systematische Auswertung der Verbundvorhaben bis auf die Ebene von Einzelergebnissen. Zu jedem Ergebnis wird auf dieser Basis eine Verwertungsstrategie erarbeitet. Dies kann zum Beispiel bedeuten, dass ein Ergebnis in einem Normungsgremium vorgestellt wird und so zu einer Anpassung eines Regelwerks führt, was die Vermarktung eines neuen Produktes ermöglicht, vereinfacht oder sogar zu einer höheren Sicherheit im Bauwesen führt. Über Veröffentlichungen oder Merkblätter können Fachleute auf die neuen Technologien und deren Anwendung hingewiesen werden, wodurch sich neue Märkte eröffnen können. Dies wird zudem durch eine gezielte Kommunikation in die Netzwerke der WiTraBau-Partner hinein beschleunigt.

Tabelle 2 Verwertungsoptionen als Basis für eine breite Verwertung

Verwertungsoptionen
Eingang in nachfolgende Forschungsprojekte
Fachspezifische Veröffentlichungen, Vorträge & Fachzeitschriften
Vorlesungen an Hochschulen, Fachhochschulen etc.
Leitfäden und Lehrmaterialien für Industrie und Gewerbe
Sachstandberichte als Vorstufe zur Regelwerkssetzung
Merkblätter mit Branchenbezug
Regelwerke mit »Normencharakter« ▪ Regelwerke der Verbundpartner; Aufnahme in bestehende oder neue Regelwerke ▪ Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen ▪ Einbringen in Normenausschüsse des DIN (NA Bau)
Anwendungsbezogene Entwicklung
Verwertungsvorschläge der Zuwendungsempfänger

3 Unterstützung abgeschlossener Projekte aus der Bekanntmachung »NanoTecture«

Zwischen 2009 und 2012 hat das BMBF als Beitrag zur Hightech-Strategie der Bundesregierung Forschungsprojekte 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 können. Das Ziel bestand darin, neue oder

deutlich verbesserte Baustoffe, Materialien, Produkte sowie Verfahren durch die Anwendung von Nanotechnologien zu entwickeln. Hierdurch sollte die Innovationskraft der deutschen Baustoffindustrie gestärkt werden. Im Vordergrund standen dabei die Themen:

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

Das Ziel des Begleitprojektes besteht darin, die Marktzugänglichkeit der Forschungsergebnisse zu beschleunigen. Um eine möglichst objektive und allumfassende Verwertung zu ermöglichen, hat sich das WiTraBau-Projektkonsortium für eine Evaluierung in Anlehnung an die Delphi-Methodik entschieden. Hierzu wurden die Abschlussberichte von jedem Projekt durch zwei WiTraBau-Verbundpartner gesichtet, in Einzelergebnisse aufgegliedert, Kurzfassungen erstellt sowie Erkenntnisstufen und Verwertungsoptionen zugeordnet. Auf Basis dieser beiden Vorschläge wurde von beiden Verbundpartnern gemeinsam ein abschließender Vorschlag erarbeitet. Die generelle Vorgehensweise ist in Bild 1 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.

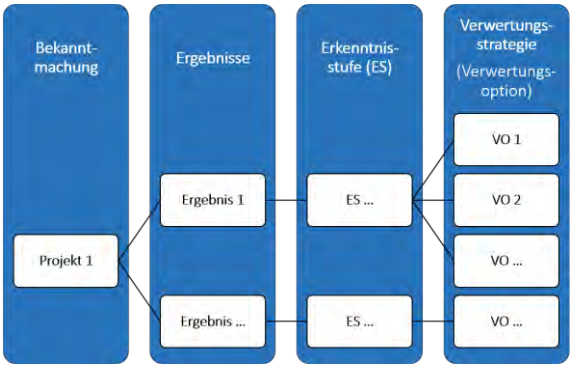


Bild 1 Entwickelte Systematik zur Ableitung einer Verwertungsstrategie

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 mit den ehemaligen Zuwendungsempfängern intensiv beraten wurden.

Insgesamt wurden anhand der 11 begleiteten Projekte aus »NanoTecture« 78 Ergebnisse identifiziert und geeigneten Erkenntnisstufen zugeordnet. Zudem münden die Ergebnisse in 302 Verwertungsoptionen. In Bild 2 ist die Verteilung der gewählten Erkenntnisstufen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass über die Hälfte der Ergebnisse dem Bereich der Grundlagenuntersuchungen und nur ein Ergebnis einer breit angelegten anwendungsbezogenen Forschung zugeordnet wurden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass nur ein Ergebnis grundsätzlich für den Eingang in ein Regelwerk geeignet ist. Alle Ergebnisse wurden entsprechend ihrem grundsätzlichen Charakter zugeordnet und bilden über die Verwertungsoptionen eine breitere Verwertung ab, als die Erkenntnisstufen zunächst vermuten lassen. In Bild 3 wird ersichtlich, dass mindestens 5 Ergebnisse Eingang in Normungsgremien finden. Ca. ein Drittel der Ergebnisse werden als geeignet angesehen, um eine weitere Produktentwicklung anzustoßen, was zu guter Letzt jedoch im Ermessen der Hersteller liegt.

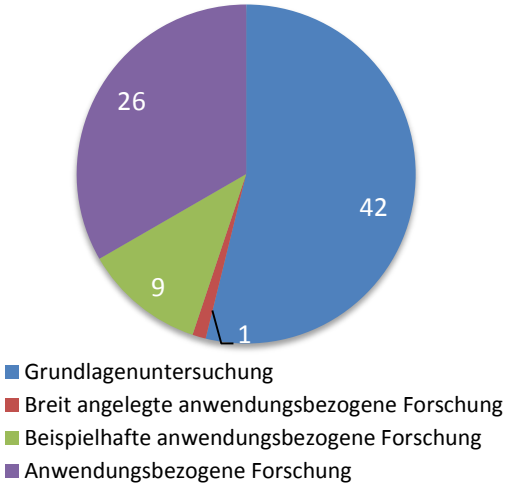


Bild 2 Verteilung der zugeordneten Erkenntnisstufen für die begleiteten Projekte aus der Bekanntmachung »NanoTecture«

Die ausgeprägte Ausrichtung zu der Erkenntnisstufe »Grundlagenuntersuchungen« spiegelt sich in der Verwertungsoption »Weitere Forschungsprojekte« und »Veröffentlichungen« in Bild 3 wieder, die ca. ein Drittel aller zugeordneten Verwertungsoptionen ausmachen. Die restlichen zwei Drittel sind mehr oder weniger gleichmäßig verteilt. 36 Ergebnisse bieten sich nach der Ansicht des WiTraBau-Konsortiums für eine anschließende Produktentwicklung an, was teilweise bereits stattgefunden hat.

Nachdem die Verwertungsstrategien festgelegt wurden, haben die WiTraBau-Partner die Transferaktivitäten initiiert, indem die Ergebnisse in die entsprechenden Kreise, wie z. B. in die eigenen Netzwerke oder in Fachgremien, eingeflossen sind.

Die Entscheidungen über die Verwertung der Ergebnisse, z. B. in Regelwerken oder Berichten, erfolgt individuell in den entsprechenden Gremien und liegt nicht mehr in der Verantwortung der WiTraBau-Partner. Der Transfer der Ergebnisse aus NanoTecture wird in [1] und [2] am Beispiel des Ultrahochfesten Betons erläutert.

4 Unterstützung laufender Projekte aus der Bekanntmachung »HighTechMatBau«

Neue Werkstoffe sind ein zentraler Baustein zur Lösung von Fragen der Energieeffizienz und des Klimaschutzes, aber auch für eine nachhaltige Mobilität und Versorgungssicherheit. Mit der Bekanntmachung »HighTechMatBau« des BMBF sollen wesentliche Ziele im Rahmen der »Hightech-Strategie« der Bundesregierung erreicht werden. Es gilt, mit neuen Werkstoffen unsere Städte auch in und für die Zukunft lebenswert und komfortabel zu gestalten und zugleich Innovationen zur Stärkung der deutschen Wirtschaft zu unterstützen.

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 die erwarteten Ergebnisse definiert und geeigneten Erkenntnisstufen und Verwertungsoptionen zugeordnet werden. Hierzu haben sich die WiTraBau-Partner mit den Projektkonsortien getroffen und eine gemeinsame Strategie erarbeitet. Auf Basis dieser vorläufigen Verwertungsstrategie soll der Verwertungsprozess, sobald die Ergebnisse öffentlich zur Verfügung stehen, beschleunigt durchgeführt werden. Zudem hilft der Fokus auf einer konkreten und breiten Verwertungsstrategie auch den forschenden Stellen, mit ggf. kleinen Anpassungen eine breitere Verwertung zu erreichen. Während der Projektlaufzeit werden die Verwertungsstrategien laufend angepasst.

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.

5 Zusammenfassung

Eine Verwertungsstrategie ist ein wesentlicher Baustein für den Erfolg eines Forschungsprojektes sowie des zugrundeliegenden Förderprogramms. Basierend auf den dargestellten Arbeiten ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Identifizierung wesentlicher Ergebnisse ist eine geeignete Basis für die Weiterentwicklung zu einer Verwertungsstrategie.
- Die Zuordnung der Ergebnisse zu Erkenntnisstufen und Verwertungsoptionen bietet einen systematischen Rahmen, um eine breite Verwertungsstrategie abzuleiten und möglichst alle Aspekte zu berücksichtigen.
- Das Herunterbrechen von Projekten auf wesentliche Ergebnisse ermöglicht eine zielgerichtetere Verwertung für die unterschiedlichen interessierten Kreise der gesamten Wertschöpfungskette Bau. Durch die entwickelte Systematik kann einer breiten Ergebnispalette Rechnung getragen werden.
- Für alle 28 begleiteten Forschungsprojekte konnte anhand der vorgestellten Systematik eine Verwertungsstrategie abgeleitet werden.
- Die Vorgehensweise ermöglicht eine Auswertung der Verwertungsaktivitäten. Anhand der Ergebnisse aus »NanoTecture« konnte gezeigt werden, dass sich ein wesentlicher Anteil der Forschungsergebnisse im Bereich der Grundlagenforschung bewegt, jedoch ein hohes Potential für eine breite Verwertung aufweist.

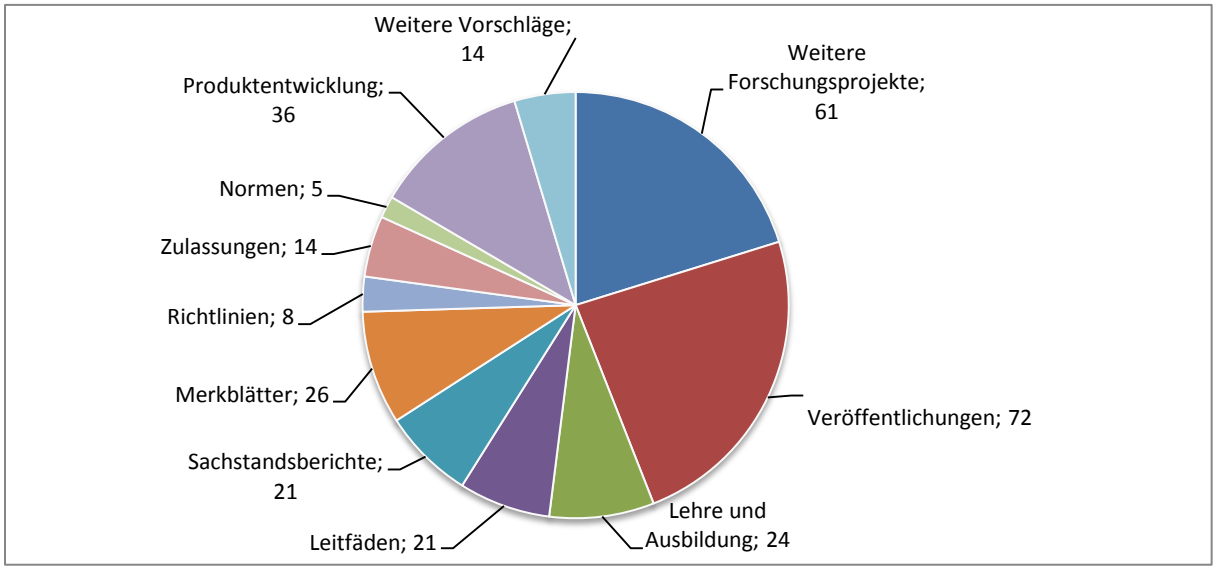


Bild 3 Verteilung der zugeordneten Verwertungsoptionen für die begleiteten Projekte aus der Bekanntmachung »NanoTecture«, Zahlenangabe entspricht der Anzahl an Zuordnungen zu Ergebnissen

6 Ausblick

Es wurden bereits Themenkolloquien abgehalten und es sind weitere Themenkolloquien geplant, in deren Rahmen die Chancen und Risiken hinsichtlich des Praxiseinsatzes ausgewählter Technologien mit Fachleuten beraten und in die Verwertungsstrategien einfließen werden.
Nähere Informationen können der Internetseite www.hightechmatbau.de entnommen werden.

7 Danksagung

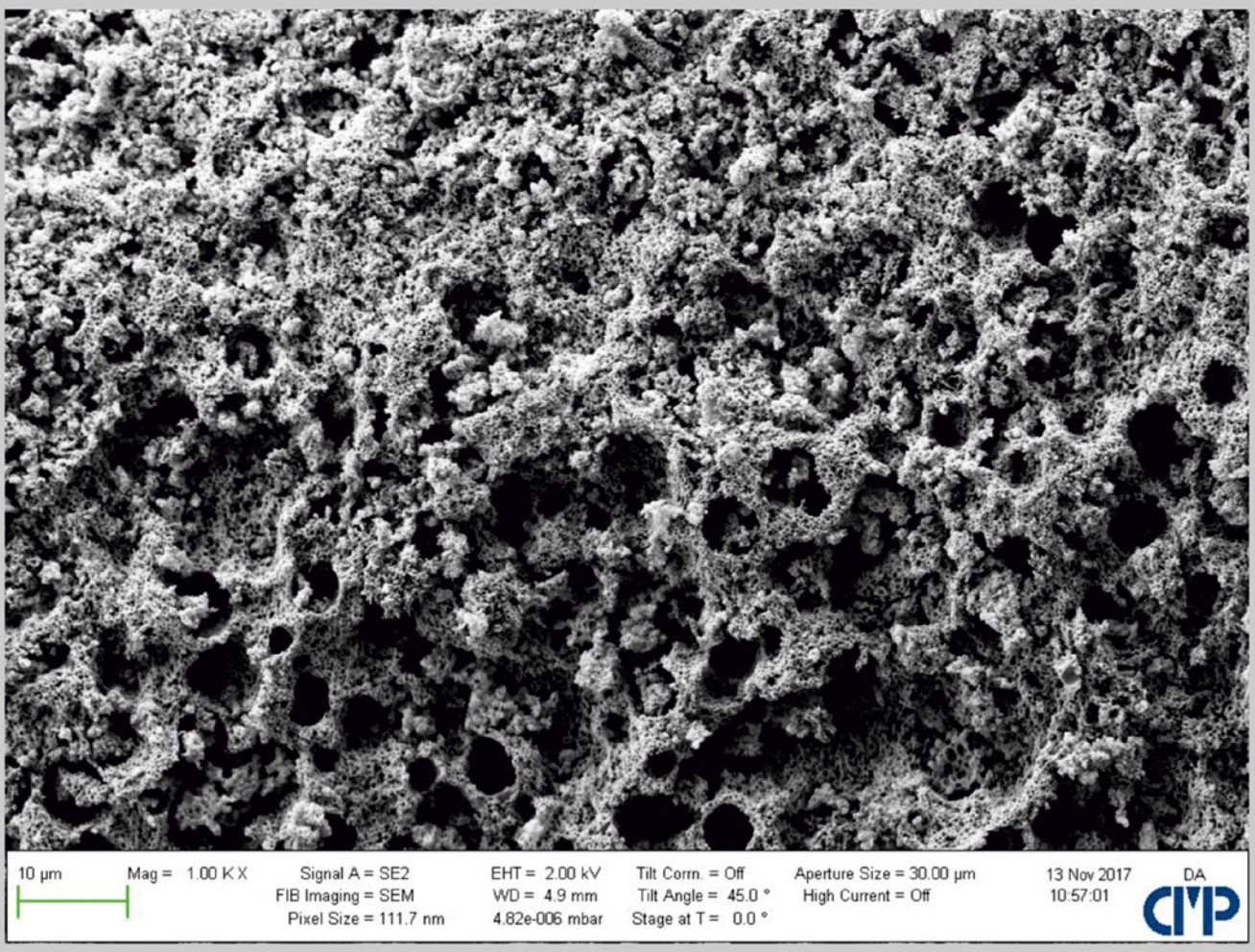
Das BMBF geht den wichtigen Weg, die Entwicklung innovativer Technologien ganzheitlich zu unterstützen. Hierbei stehen nicht nur die Forschungsaktivitäten an Werkstoffen und Technologien im Fokus der Förderer, sondern auch die aktive Unterstützung des Technologietransfers in die Praxis.
Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung, dem VDI Technologiezentrum GmbH, die mit der Beratung und Umsetzung der Förderrichtlinie betraut wurden sowie allen Projektpartnern.
Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des BMBF unter den Förderkennzeichen 13N13540 bis 13N13546 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

[1] K. Reichling und P. Schäffel, »WiTraBau – Neue Werkstofftechnologien für Hochleistungsbetone in die Praxis gebracht«, in 61. Betontage, Neu-Ulm, 2017.
[2] P. Schäffel und C. Müller, »Transfer of innovative research results into German Cement Industry«, in fib Symposium, Where Technology and Engineering Meet, Maastricht, Netherlands, 2017.

AeroBasalt

KMU-innovativ Mittelstand



ITA Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau

RWTH AACHEN UNIVERSITY

GETA Interieur®

Erforschung eines energieeffizienten, ultraleichten, recycelbaren Faserverbundwerkstoffes aus Basaltfasern und Silikat-Aerogelen

Thilo Becker, Lars Appel, Thomas Gries, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University
Gerald Grübler, Michael Hitz, Robert Buhmann, GETA mbH

Kurzfassung: Durch die Zusammenarbeit der GETA mbH und des Instituts für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University werden die Bereiche der Textiltechnik und Materialwissenschaften vereint, um ein neuartiges Wärmeisolationsmaterial aus einer Aerogelmatrix und Verstärkungsfasern aus Basalt zu erforschen. Das Ziel des Projekts ist es, einen neuartigen high-performance Wärmedämmstoff zu erforschen, der haltbar und fest, aber trotzdem hochdämmend, leicht und recycelbar ist.

Stichworte: Aerogel, Dämmstoff, Basalt, Composite, Verbundmaterial, Faserverstärkt, Textiltechnik, Synthesechemie, Materialtechnik

1 Stand der Technik

In den letzten Jahren hat das Streben nach einer grüneren Zukunft und einer Verringerung der Treibhausgasemissionen an Dynamik gewonnen und es wurden umfangreiche Forschungsarbeiten zur Suche nach alternativen Energiequellen und zur Verringerung des Energiebedarfs durchgeführt. Da Raumwärme weiterhin ein wesentlicher Bestandteil des Energieverbrauchs eines typischen Wohnhauses in Deutschland ist, sind neuartige Dämmtechnologien ein wichtiges Forschungsgebiet, um den Energiebedarf der Haushalte zu senken [1]. Derzeit werden in Wohngebäuden am häufigsten hybride Wärmedämmverbundsysteme aus synthetischen organischen Materialien wie Polystyrol oder Polyurethan mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,02–0,05 W/mK und einer faserverstärkten Putzdeckschicht eingesetzt. In höheren, mehrstöckigen Gebäuden werden oft Fassadenverkleidungen mit darunter liegenden synthetischen organischen Dämmplatten eingesetzt.

Diese Systeme bestehen derzeit aus nicht erneuerbaren Rohstoffen und die Ereignisse der Vergangenheit haben gezeigt, dass einige dieser Wärmedämmungssysteme eine wichtige Rolle bei katastrophalen Bränden spielen können. Eine hochisolierende, aber dennoch recycelbare Alternative für private und gewerbliche Anwendungen würde sich positiv auf die Treibhausgasemissionen und unsere Umwelt auswirken. Daher werden in dem »AeroBasalt«-Projekt eine neuartige Form von anorganischen Wärmedämmplatten aus basaltfaserverstärkten Silica Aerogelen erforscht.

1.1 Silica Aerogele

Silica Aerogele sind anorganische Feststoffe mit extrem hohen Porenvolumengehalten von bis zu 99 %. Aufgrund dieses hohen Porenanteils sind Silica Aerogele mit nur 1,90 g/m³ extrem leicht [2]. Zudem wurden Wärmeleitfähigkeit von nur 0,004 W/mK nachgewiesen [3]. Dies macht Silica-Aerogele zu einem vielversprechenden Ausgangsstoff für neuartige Hochleistungsisolierungen. Einer der Hauptnachteile von Silica-Aerogelen ist jedoch ihre geringe Biegefestigkeit und Sprödigkeit. Silica-Aerogel-Monolithen sind derzeit nicht für den Einsatz als Gebäudedämmung geeignet, da sie beim Transport und bei der Montage brechen würden. Aktuelle auf Aerogel basierende Isolationslösungen verwenden in der Regel nur Aerogel-Partikel anstelle von Monolithen. Dadurch wird das isolationspotential der Aerogele bei weitem nicht ausgeschöpft. Zudem kommt es bei einiger dieser Lösungsansätze zu starker Staub-Bildung.

Bild 1 Silica Aerogel Monolith

Zur Synthese von Silica Aerogelen sind eine Vielzahl an Ausgangsstoffe als Quelle der Silica Struktur sowie verschiedene Reaktionsvorschriften bekannt. Tetraethylorthosilikat (TEOS) ist eins der am meisten verwendeten Ausgangsmaterialien für Silica Aerogele, aber auch Methyltriethoxysilan (MTES) sowie weitere Ausgangsstoffe können verwendet werden. Je nach Ausgangsstoff muss unter Umständen eine Überkritische Trocknung durchgeführt werden, um die Porenstruktur des Aerogels zu erhalten.

1.2 Basalt

Da jährlich bis zu 2,6 Billionen Tonnen Basaltgestein durch natürliche Prozesse entstehen, kann es als natürlich nachwachsender Rohstoff betrachtet werden. Darüber hinaus benötigen Basaltfasern weniger Energie und verursachen bei ihrer Herstellung weniger CO_2-Emissionen als herkömmliche Glas- oder Kohlenstofffasern. Für den Einsatz in Dämmplatten weisen Basaltfasern eine Reihe weiterer Vorteile auf [4]:

- Geringe Wärmeleitfähigkeit
- 15 % höhere Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul als E-Glasfasern
- Hohe Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt bei 1.450 °C, weniger als <1 % brennbare Stoffe)
- Hoher Schallabsorptionsgrad
- Gute Beständigkeit gegen UV-Strahlung
- Gute Beständigkeit gegen Mikroorganismen und Schimmelpilze
- Geringe gesundheitliche Belastung (nicht krebserregend)
- Niedriger Preis (2,5–3,5 €/kg)

Ein Verbund aus Basaltfasern und Silica-Aerogel ist nicht brennbar. Dies ist nicht nur für Gebäudeanwendungen von Vorteil, sondern auch für Hochleistungsanwendungen wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt oder im Automobilbau.

2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, anorganische Basaltverstärkungsfasern einzusetzen, um die mechanischen Eigenschaften eines Silica-Aerogel-Monolithen zu verbessern. Abhängig vom umgebenden Matrixmaterial können Faserverstärkungen die mechanischen Eigenschaften von ansonsten schwachen Materialien erheblich verbessern. Aufgrund der schwachen mechanischen Eigenschaften der Silica-Aerogele soll anhand der Verstärkung mit Basaltfasern eine Grundlage für neuartige Wärmedämmsysteme im Baubereich erforscht werden.

3 Forschungsansatz

Die Herstellung von Aerogel-Basalt-Verbundwerkstoffen besteht aus vier Teilschritten: der Faserauswahl und Oberflächenmodifizierung, der Erzeugung einer textilen Struktur, der Herstellung der Aerogelmatrix und der Tränkung der Textilien (Bild 2).

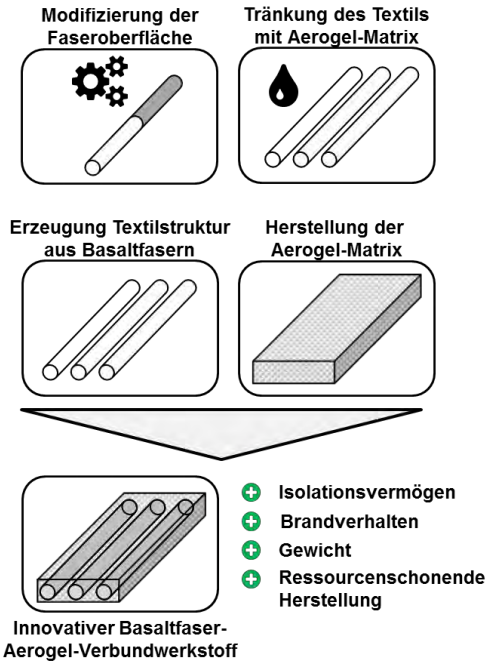


Bild 2 Übersicht des Ansatzes im Projekt AeroBasalt

Innerhalb der einzelnen Teilschritte zur Herstellung des Verbundwerkstoffs werden verschiedene Parameter variiert, um Verarbeitbarkeit sowie die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs zu optimieren. Es werden verschiedene Arten von Faserverstärkungen untersucht, um die am besten geeignete Basaltfaser und Schlichte für faserverstärkte Silica-Aerogelen zu bestimmen. Des Weiteren werden verschiedene

Armierungstextilien wie Vliesstoffe, Gewebe, Kurzfasern, Sandwichstrukturen sowie deren Kombinationen hergestellt und untersucht.

Ein Kompromiss zwischen den mechanischen Eigenschaften und den Isolationseigenschaften des Verbundwerkstoffes wird erforscht, um die Faserverstärkung zu optimieren. Dazu werden Muster mit unterschiedlichen textilen Verstärkungen auf ihre mechanischen Eigenschaften geprüft. Eine einfache Übertragung gängiger Prüfmethoden auf das Aerogel-Verbundwerkstoffs ist aufgrund der Sprödigkeit der Aerogel-Matrix nicht möglich. Neuartige Einspannungsmethoden des Verbundwerkstoffs in einer Prüfvorrichtung sowie maßgeschneiderte Testparameter für Standardtests werden entwickelt, um genaue Tests zu ermöglichen. Es wird ein Testverfahren entwickelt, um die Faser-Matrix-Haftung sowie die visuelle Kontrolle der Faser-Matrix-Grenzfläche unter dem Mikroskop zu bewerten. Die Auswahl der am besten geeigneten textilen Verstärkung erfolgt anhand der allgemeinen mechanischen Eigenschaften, der Komplexität der Verarbeitung sowie der isolierenden Eigenschaften.

Bei der basenkatalysierten TEOS-basierten Synthese von Silica-Aerogelen werden basische Katalysatoren benötigt, um die Hydrolyse-Reaktion zwischen TEOS und Wasser einzuleiten. Diese Reaktion ist notwendig, um eine poröse Silica-Aerogel-Matrix zu erzeugen. Aufgrund der daraus resultierenden aggressiven chemischen Umgebung werden verschiedene Basaltzusammensetzungen und Schlichten getestet, um die am besten geeignete Faserart zu bestimmen. Es werden jedoch auch Basaltfasern mit geringer Alkalibeständigkeit in Betracht gezogen, da einige Verluste in den mechanischen Eigenschaften der Basaltfasern toleriert werden können. Man geht davon aus, dass die volle Zugfestigkeit von Basaltfasern nicht erforderlich ist, um die erforderliche Festigkeit eines Bauwerksdämmstoffes zu erreichen. Darüber hinaus könnte ein gewisser chemischer Angriff auf die Oberfläche der Basaltfasern zu vorteilhaften Oberflächeneigenschaften führen, die die Bindung entlang der Faser-Matrix-Grenzfläche verbessern könnten. Die Faser mit der besten Haftung auf der Silica-Aerogel-Matrix wird für weitere Untersuchungen ausgewählt.

4 Ausblick

Die **GETA mbH** und das **Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University** wollen bis Mitte des Jahres 2019 einen erstes Muster einer Aerogel-Dämmplattenprobe herstellen, die den typischen Belastungen, die auf eine Platte zur Gebäudedämmung einwirken, standhält. In Zukunft könnte diese neuartige monolithische, faserverstärkte Aerogel-Isolierung nicht nur im Bausektor eingesetzt werden, sondern auch in anderen Anwendungen, in denen niedrige Wärmeleitfähigkeit, Feuerbeständigkeit und geringes Gewicht erwünschte Eigenschaften sind. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms KMU-innovativ gefördert

Literaturverzeichnis

[1] Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen, BMWi, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-09.html [Stand 03.12.2017]

[2] Gurav, J. L. et al.: »Silica Aerogel: Synthesis and Applications«. Journal of Nanomaterials. 2010 (2010)

[3] Aerogels Terms, URL: https://web.archive.org/web/20050718075757/http://www.llnl.gov/IPandC/technology/profile/aerogel/Terms/index.php [Stand 03.12.2017]

[4] Schulze, Manfred: Basalt: unerschöpflich und unausgeschöpft, VDI, URL: http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Basalt-unerschoepflich-unausgeschoepft [Stand 03.12.2017]

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13XP5039A und 13XP5039B gefördert.

GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung

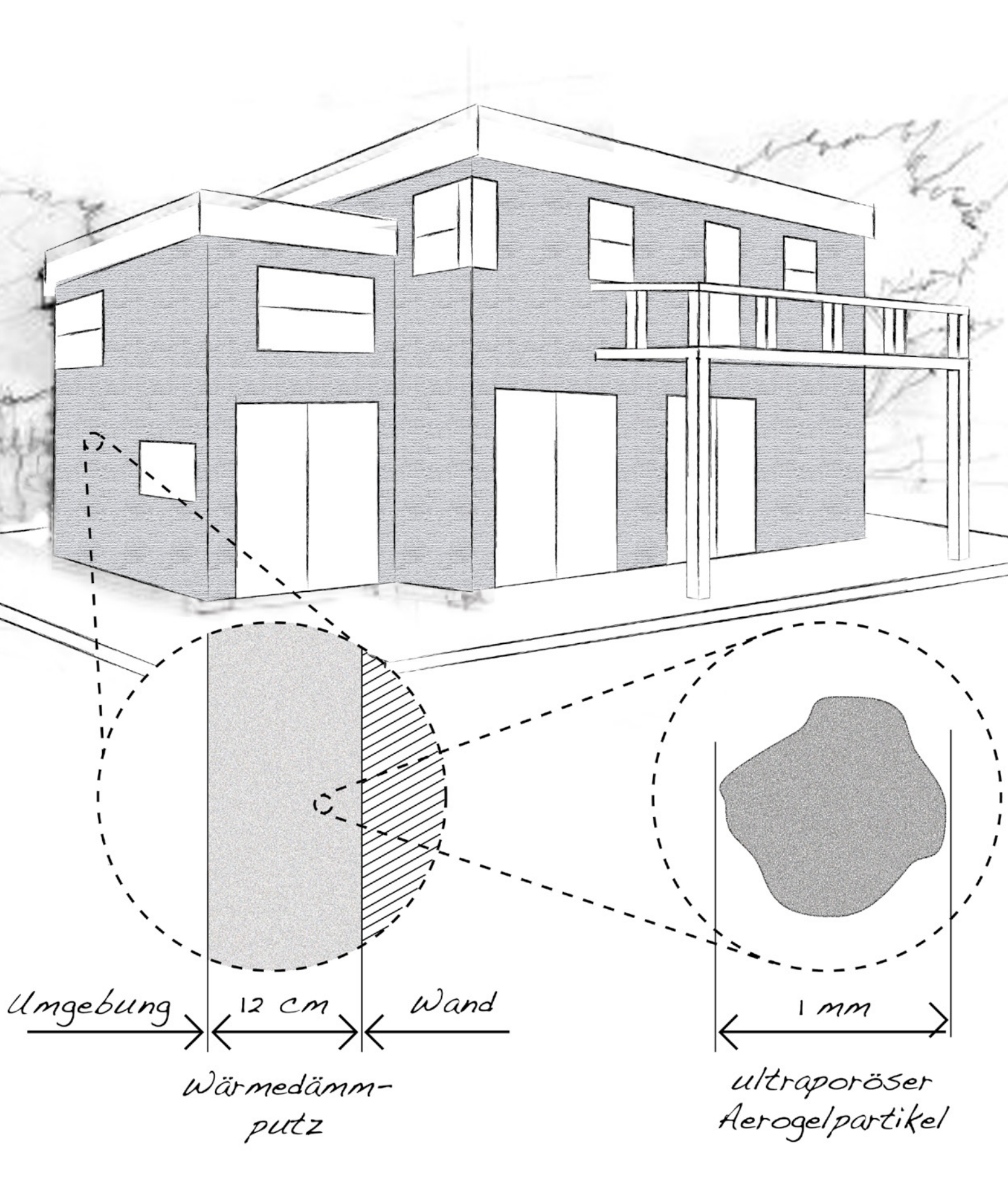
GETA Interieur®

ITA Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Aeroputz

KMU-innovativ Mittelstand



Aerogele in der Anwendung für mineralische Hochleistungswärmedämmputze

Christoph Dworatzyk: PROCERAM GmbH & Co. KG,
Andreas Sengespeick, Nils Mölders: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Kurzfassung: Das vom BMBF geförderte Forschungsvorhaben beschäftigt sich während seiner zweijährigen Projektlaufzeit mit der Entwicklung eines preislich konkurrenzfähigen aerogelbasierten Hochleistungsdämmputzsystems. Die wesentlichen Vorteile dieser Systeme liegen in der fugenlosen Dämmschicht, der geringeren benötigten Auftragsstärke und der damit einhergehenden wesentlich besseren Möglichkeit, Wärmebrücken bei Bestandsrenovierungen zu vermeiden.

Stichworte: Aerogele, Wärmedämmputz, Aerogelputz, Wärmeleitfähigkeit, W-Wert, S_d-Wert

1 Grundlagen und Motivation

Die Dämmung eines Hauses ist heutzutage Pflicht für jeden Bauherren. Erst im Januar 2016 hat die Bundesregierung nochmals die Energie-Einsparverordnung für Gebäude verschärft. Der Heizenergieverbrauch in deutschen Wohngebäuden soll bis 2050 um 80 Prozent gesenkt werden, um die Kohlendioxidemissionen zu reduzieren. Immobilien müssen künftig mit noch weniger Energie auskommen als bisher. Um die strengen Anforderungen zu erfüllen, ist eine gute Wärmedämmung von Wänden und Dächern erforderlich. Sie verhindert, dass große Teile der Heizenergie ungenutzt in die Umwelt entweichen. Dazu wird die Gebäudefassade mit wärmedämmenden Materialien ausgekleidet. Mineralischer Wärmedämmputz auf Aerogelbasis bietet einen neuen, innovativen Lösungsansatz. Aerogel-Wärmedämmputz soll aufgrund der extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit von 0,017 W/m·K (50 % geringer als Polystyrol oder Mineralwolle) in geringer Auftragsstärke appliziert werden. Die wesentlichen Vorteile dieses Systems liegen im fugenlosen Auftrag der Dämmschicht, der geringeren benötigten Auftragsstärke von maximal 8 cm und der damit einhergehenden wesentlich besseren Möglichkeit, Wärmebrücken bei Fenster-, Türlaibungen sowie bei Stürzen und Dachanschlüssen zu vermeiden.

2 Zielsetzung

Das Vorhaben bezieht sich auf das Rahmenprogramm »Vom Material zur Innovation« und ist Teil der neuen Hightech-Strategie des BMBF und der Ausschreibung »KMU-innovativ: Nanotechnologie«. Das Förderprogramm adressiert die Entwicklung neuer Materialien mit klar definierten neuen Eigenschaften. Im Fokus des beantragten Vorhabens steht die Entwicklung eines aerogelbasierten isolierend wirkenden Putzes.

3 Untersuchungen

Zu Projektbeginn wurde ein Systemaufbau für einen Aerogel-Dämmputz entwickelt. Der Systemaufbau besteht aus einer Untergrundbehandlung, Vorspritzmörtel, Putzträger, Putzarmierung, Oberputz und abschließendem Anstrich. Wichtig für einen voll funktionsfähigen Systemaufbau ist die richtige Auswahl der jeweiligen Bindemittel und Zuschlagsstoffe, die maßgeblich für die hygrothermischen Eigenschaften, Dämmwirkung, Diffusionsfähigkeit, Druckfestigkeit, das Haftverhalten, die Zugfestigkeit sowie das Brandverhalten verantwortlich sind. Um Spannungsrisse und eine Delamination zu vermeiden, muss z. B. das E-Modul der Putzschichten eingestellt werden. Um dies zu erreichen, wurden Faserverstärkungen mittels natürlicher Fasern erprobt. Der Schichtaufbau musste im Haftverbund hinsichtlich

Wärmeausdehnung und Bindemittelwahl aufeinander abgestimmt werden. Eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit des Putzsystems ist zwingend erforderlich und bewirkt günstige Austrocknungsbedingungen für das Mauerwerk. Daraus ergab sich das folgende, als neuartig zu klassifizierende Anforderungsprofil an das Wärmedämmputz-System.

1. Das E-Modul mit einer Druckfestigkeit nach DIN EN 998-1C:2017-2 konnte durch den Einsatz weiterer poröser Füllstoffe auf die Klasse CII mit >1,5 N/mm² erreicht werden.
2. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu < 20$ konnte im Gesamtsystem durch die begleitende Entwicklung einer hoch diffusionsoffenen Fassadenfarbe erreicht werden.
3. Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke S_d-Wert konnte dadurch auf 0,1 m für die Farbschicht herabgesetzt werden (vgl. [DIN EN ISO 12572:2017]).
4. Der Wasseraufnahmekoeffizient W-Wert wurde über den Hydrophobierungsgrad der Aerogelpartikel und der eigens entwickelten Fassadenfarbe auf Werte <0,1 kg/(m^2·h0.5) herabgesetzt (vgl. [DIN EN ISO 15148:2003]).
5. Die Brandstoffklasse A1 nach DIN EN 4102-1:1998-05 konnte durch den Einsatz eines kalkbasierten Bindersystem erzielt werden.
6. Die Wärmeleitfähigkeit des Putzsystems konnte zwischen 0,035 und 0,028 W/m·K eingestellt werden.

4 Beispielhafte Ergebnisse

Während des laufenden Projekts wurden frühzeitig Testflächen mit unterschiedlichen Aerogel-Putzformulierungen angelegt, um diese zu analysieren und zu bewerten. Unter Freilandbewitterung konnten Rückschlüsse auf das Trocknungsverhalten und die hygrothermischen Eigenschaften gezogen werden.

4.1 Berechnungen zum Feuchteschutz

Nach Ermittlung der Materialkennwerte wie Wärmeleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstand, Dichten und Wärmekapazitäten konnten erste Berechnungen zum Feuchteschutz nach DIN 4108-3 durchgeführt werden. Am Beispiel eines Mauerwerks aus 375 mm HLZ, wie es häufig in den 1980er Jahren Anwendung fand (Wärmeleitfähigkeit von 0,58 W/m·K), wurden exemplarische Berechnungen durchgeführt. Im Ergebnis ist der untersuchte Wandaufbau frei von Tauwasserbildung im Bauteilinnern. Der S_d-Wert der gesamten Konstruktion fällt mit 3 m gering aus. Bei vergleichbaren Wandaufbauten mit Mineralwolldämmung wird ebenfalls ein geringer S_d-Wert von 5 m erreicht, jedoch kann es zu Tauwasserbildung unter den überwiegend eingesetzten Silikonharzputzen und -farben kommen, vergleiche Bild 1 und 2.

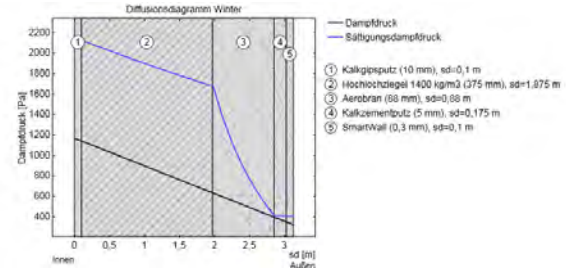


Bild 1 Berechnungen zum Feuchteschutz mit 88 mm Aerobran Dämmputz und abschließendem Farbanstrich (U-Wert 0,237 W/m^2·K)

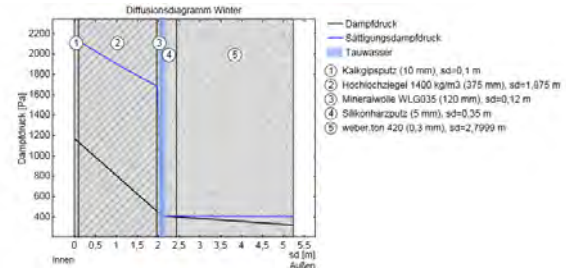


Bild 2 Berechnungen zum Feuchteschutz mit 120 mm Mineralwolldämmung und Silikonharzputz (U-Wert 0,235 W/m^2·K)

4.2 Infrarotaufnahmen

Die Grundvoraussetzung für das Thermografieren der äußeren Gebäudehülle ist immer dann gegeben, wenn ein durch Temperaturunterschiede erzwungener, zeitlich möglichst konstanter Wärmestrom fließt. Dieser Wärmestrom erzeugt dann durch die lokal unterschiedlichen Wärmewiderstände der durchströmten Bauteile lokal unterschiedliche Oberflächentemperaturen, die von der Thermografiekamera erfasst werden. Moderne hochauflösende Infrarot-Thermografiekameras können Temperaturdifferenzen an den Bauteiloberflächen von wenigen hundertstel Grad sichtbar machen, sodass zum Aufbau des Wärmestroms und zur eindeutigen Erkennung von Schwachstellen bereits Temperaturunterschiede zwischen dem Inneren eines zu untersuchenden Gebäudes und der Außenluft ab ca. 10 °C ausreichend sind. Neben einer definierten Außen- und Innenlufttemperatur können Umwelt-

einflüsse wie Wind, Regen und Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung oder Abkühlung der Gebäudehülle führen und die wärmestrombedingten Temperaturen an der Bauteiloberfläche verfälschen. Damit wird der Zeitraum zur Durchführung der Gebäudethermografie deutlich eingeengt, vorzugsweise auf die frühen Morgen- oder späten Abendstunden bei windstillem und trockenem Wetter (vgl. [1]).

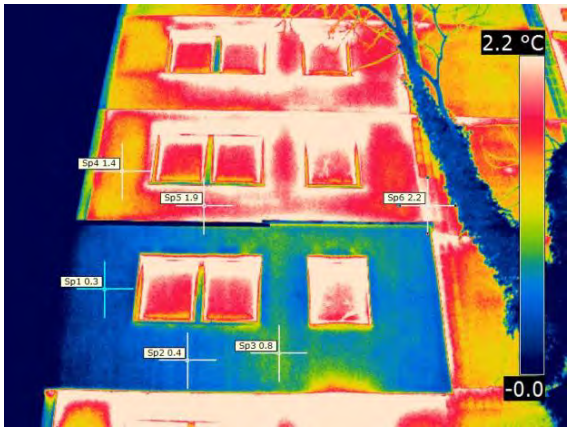


Bild 3 Infrarotaufnahme erster angelegter Testflächen mit Aerogel-Dämmputz

Die Infrarotaufnahmen wurden an einer Testfläche in 12524 Berlin-Schönefeld durchgeführt (siehe Bild 3). Die Außentemperaturen betrugen am Messtag 0,1 °C. Im Ergebnis zeigten sich Unterschiede in der Oberflächentemperatur von 1,1 °C bei der mit 60 mm Aerogel-Putz sanierten Außenfläche. Dies entspricht in etwa einem mutmaßlich ermittelten U-Wert von 0,5 W/m^2·K.

4.3 U-Wert Messungen

Zur Bestimmung des U-Werts wurde eine Temperaturdifferenzmethode eingesetzt. Als Messgerät kam ein Testo 635 zum Einsatz. Für die U-Wert-Messungen wurden vergleichende Messungen an den Gebäuden in 12524 Berlin durchgeführt. Ergänzend dazu wurden neuartige Arcada-Rapid-U-value-Meter eingesetzt, um die bisherigen Untersuchungen zu validieren. Bei diesen Messgeräten wird die Wärmeströmung durch die Wand bestimmt. Zur Berechnung der exakten Ergebnisse werden die Sonneneinstrahlung und die Luftgeschwindigkeiten bestimmt und die Wärmeübergangswiderstände entsprechend angepasst. Für den R_{se}-Wert wurde mit 0,04 m^2·K/W und für den R_{si}-Wert mit 0,13 m^2·K/W gerechnet. An dem Messtag herrschten ideale Messbedingungen, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von rund 80 % schwankte die Außentemperatur zwischen +1,5 °C bis auf –0,9 °C.

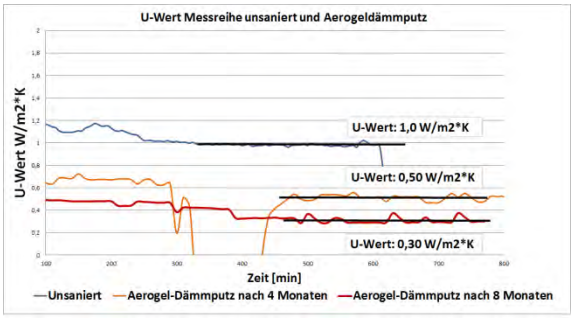


Bild 4 U-Wert Messungen im Vergleich unsanierte Fassade mit 4 und 8 Monate getrockneter Aerogel-Dämmputzsanierung

Die Ausgangs-U-Werte der nicht sanierten Fassade, ausgeführt in Plattenbauweise nach WBS-70, mit Kerndämmung, aus dem Baujahr 1990, liegen bei 1,0 W/m^2·K (siehe Bild 4). Die sanierte Fassade mit 60 mm vollständig abgetrocknetem Aerogel-Dämmputz weist U-Werte von 0,3 W/m^2·K auf. Um den Einfluss der Trocknungszeit zu ermitteln, wurden im Vorfeld an den Testflächen Untersuchungen durchgeführt. Die Messergebnisse der U-Wert-Analysen ergaben 0,5 W/m^2·K an den vier Monate alten Testflächen. Wiederholungsmessungen nach weiteren 4 Monaten Trocknungszeit zeigen ein mittlerweile vollständig durchgetrocknetes Aerogel-Dämmputzsystem, das sich in gesteigerten Wärmedämmeigenschaften und in einem geringeren U-Wert von 0,3 W/m^2·K widergespiegelt.

5 Literaturverzeichnis

[1] Tanner, BC., Nachvollziehbare Beurteilung von Gebäudethermogrammen mit der Methode »QualliThermo«, 7th international Buildair-Symposium, 05/2012

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13XP5018A und 13XP5018B gefördert.

cerabran

Fraunhofer UMSICHT

CFC-SYS

HighTech MatBau

CFK-vorgespannte Fußgängerbrücken aus Carbonbeton in Systembauweise

Vorbemessung und experimentelle Untersuchungen

Sophia Perse, Norbert Will, Josef Hegger, Institut für Massivbau, RWTH Aachen

Kurzfassung: Bei Betonbrücken treten Korrosionsschäden an der Betonstahl- und Spannstahlbewehrung auf. Die damit verbundenen Tragfähigkeitsverluste sowie die optischen und ästhetischen Mängel erfordern aufwändige Sanierungen oder Neubauten. Durch die Entwicklung eines modularen Fußgängerbrückensystems mit ausschließlich nicht-metallischer Bewehrung sollen die Voraussetzungen für dauerhafte und wirtschaftliche Fußgängerbrücken geschaffen werden. Der Einsatz einer Bewehrung aus korrosionsbeständigem carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) ermöglicht die Herstellung schlanker und langlebiger Bauteile. Um die Dauerhaftigkeit zu erhöhen und Kosten zu senken, wird ein gefügedichter, hochfester Beton verwendet, sodass auf zusätzliche Straßenbeläge verzichtet werden kann. Mit einer modularen Systembauweise aus vorgespannten Fertigteilen kann eine schnelle Montage und Demontage der Fußgängerbrücken umgesetzt werden. In diesem Beitrag wird der aktuelle Stand des Forschungsprojektes präsentiert.

Stichworte: Textilbeton; CFK; Vorspannung mit sofortigem Verbund; Fußgängerbrücken

1 Einleitung

In einem Pilotprojekt wurde 2010 in Albstadt eine 97 m lange Fußgängerbrücke mit einem Überbau aus Textilbeton fertiggestellt [1]. Der Querschnitt wurde mit Stahlmonolitzen vorgespannt, was mit verhältnismäßig größeren Stegbreiten und einer nicht optimalen Ausnutzung der Spannbewehrung verbunden war. Weiterhin konnte die dort eingesetzte textile Bewehrung aus AR-Glas wegen der Anforderungen aus der Dauerhaftigkeit nicht voll ausgenutzt werden. Im aktuellen Forschungsprojekt sollen diese Einschränkungen beseitigt und der Weg zu einer Bauweise nur mit nichtmetallischer Bewehrung geebnet werden. Das nicht korrodierende und höher ausnutzbare CFK-Material erlaubt, es entweder die Stegbreite oder die Steganzahl zu reduzieren. Dadurch lassen sich einerseits Ressourcen einsparen und andererseits architektonisch anspruchsvolle Entwürfe umsetzen, die für Betonkonstruktionen zu nicht erwarteten Schlankheiten führen. Zudem ist die feinkörnige Betonmatrix gefügedicht, sodass auf zusätzliche Straßenbeläge verzichtet werden kann. Da Korrosionsschäden infolge Tausalzeinwirkungen und Bewitterung vermieden werden, sind eine bessere Dauerhaftigkeit und lange Lebensdauern der Brücken zu erwarten.

2 Vorbemessung

Zu Beginn der Vorbemessung wurden die Anforderungen an das modulare Fußgängerbrückensystem bezüglich Querschnitt, Spannweite und Vorspanngrad in Abhängigkeit der Belastung und der Randbedingungen definiert. Es wurden zwei Varianten mit kurzer (V1) und langer (V2) Spannweite festgelegt, an denen die Vorbemessung in Abschnitt 2.5 exemplarisch erläutert wird. Weiterhin wurden die Materialeigenschaften der CFK-Bewehrungen und des Betons bestimmt.

2.1 Materialien

Die für die Vorbemessung relevanten Materialeigenschaften des Betons und der CFK-Bewehrungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Teilsicherheits-beiwert für die CFK-Bewehrungen wird in

Anlehnung an die Bemessung der Fußgängerbrücke in Albstadt zu 1,5 angenommen [1].

Tabelle 1 Materialeigenschaften

	f_m [MPa]	f_k [MPa]	f_d [MPa]	E_m [MPa]
Beton	78	70	39,7	41.000
CFK-Textil	3000	2400	1600	180.000
CFK-Spannstab	3000	2400	1600	180.000

2.2 Abmessungen

Die Abmessungen der Querschnitte wurden unter Berücksichtigung aktueller Richtlinien und der Begrenzung durch Herstellung und Transport gewählt. Nach [2], [3] sollte die minimale Breite einer Fußgängerbrücke 2,5 m betragen. Für die vorgestellten Varianten wurde aus Transportgründen eine einheitliche Breite von 3,00 m festgelegt. Die Spannweiten des modularen Brückensystems wurden so gewählt, dass gängige Abmessungen von Straßen und Flüssen überspannt werden können. Um eine breites Spektrum möglicher Spannweiten abzudecken, wurden für die Vorbemessung eine kurze Spannweite von 12,0 m und eine lange Spannweite von 25,0 m definiert.
In Anlehnung an die Brücke in Albstadt [1] wurde ein Plattenbalkenquerschnitt mit einer reduzierten Anzahl von 4 Stegen für beide Varianten festgelegt. Die Stegbreite ergibt sich aus der Anzahl der benötigten Spannstäbe. Die Plattendicke beträgt 120 mm inklusive einer 10 mm Verschleißschicht. Die Gesamthöhe des Überbaus wurde zu 430 mm bzw. 900 mm festgelegt, woraus sich eine Schlankheit von H/L = 1/28 ergibt. Die Abmessungen beider Varianten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Abmessungen der Brückenvarianten

Concept	W [m]	L [m]	H [m]	n_{web} [m]
V1	3,00	12,0	0,43	4
V2	3,00	25,0	0,90	4

2.3 Lasten

In Anlehnung an Eurocode 1 [4], [5] wurden die folgenden Lasten für die Vorbemessung angesetzt:

- Eigengewicht und Ausbaulast,
- Verkehrslasten infolge Fußgänger und Wind,
- Servicefahrzeug (Gesamtgewicht: 5,0 t),
- Unplanmäßige Anwesenheit eines Fahrzeugs auf der Brücke (Gesamtgewicht: 12,0 t).

2.4 Vorspannung

Für Fußgängerbrücken mit Stahlspanngliedern wird der Vorspanngrad nach Eurocode 2 [5], [6] durch den Nachweis der Dekompression unter der häufigen Lastfallkombination festgelegt. Bei der Verwendung von nicht-korrosiven CFK-Spannstäben ist die Dauerhaftigkeit unabhängig von der Begrenzung der Rissbreite. Daher gibt es keine Vorgaben zur Bestimmung des Vorspanngrads für CFK-vorgespannte Bauteile.
Im vorliegenden Fall wurde der Vorspanngrad durch den Nachweis der Dekompression unter der quasiständigen Lastfallkombination bestimmt. Hierzu wurde zunächst die zulässige Spanngliedspannung unmittelbar nach dem Vorspannen σ_{pm0} zu 1500 MPa gewählt. Die Summe der Vorspannverluste α_{csr} infolge zeitabhängigen Materialverhaltens wurde zu 15 % angenommen, da noch keine empirischen Daten ermittelt wurden. Bei der Verwendung von Spannstäben mit einer effektiven Faserquerschnittsfläche von 51 mm^2 (Ø 10 mm) ergeben sich vier Spannstäbe für Variante 1 und zehn Spannstäbe für Variante 2. Um die Spannkrafteinleitung zu gewährleisten, wird der Querschnitt von Variante 2 von einem T zu einem I-Querschnitt modifiziert. Bild 1 zeigt die resultierenden Querschnitte beider Varianten.

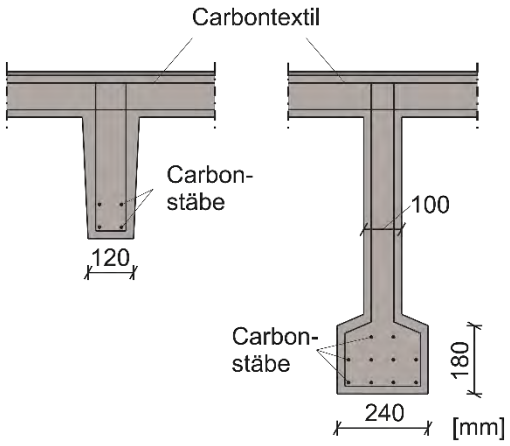


Bild 1 Querschnitt V1 (links) und V2 (rechts)

2.5 Biegebemessung

Da in Deutschland zur Zeit noch keine Bemessungsvorschriften für CFK-vorgespannte Betonbauteile verfügbar sind, wird die Vorbemessung der Brückenvarianten in Anlehnung an EC2 [5], [6] durchgeführt. Die Biegetragfähigkeit der Querschnitte im

Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) wird dabei aufgrund des linear-elastischen Materialverhaltens der CFK-Bewehrung iterativ ermittelt.
In einem ersten Schritt muss die Dehnungsverteilung im Querschnitt geschätzt werden. Für die betrachteten Querschnittsvarianten ergibt sich die Dehnungsverteilung aus der maximal möglichen Dehnungszunahme $\Delta\varepsilon_{p,max}$ der untersten Spanngliedlage. Aus der Dehnungsverteilung können die zugehörigen Spannungen der CFK-Bewehrungen und der Betons (rechteckiger Spannungsblock) berechnet werden. Die Dehnungsverteilung und Spannungsverteilung sind exemplarisch in Bild 2 dargestellt.

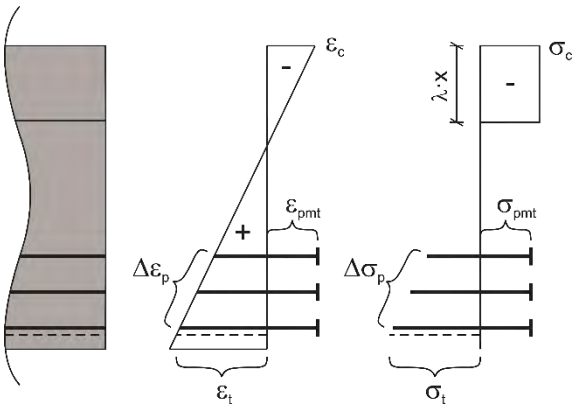


Bild 2 Dehnungs- und Spannungsverteilung

Im nächsten Schritt wird das horizontale Gleichgewicht der resultierenden Kräfte überprüft und die Dehnungsverteilung iterativ angepasst. Basierend auf der finalen Dehnungs- und Spannungsverteilung wird die Biegetragfähigkeit des Querschnitts bestimmt. Wenn die resultierende Biegetragfähigkeit größer als die einwirkende Biegebeanspruchung ist, ist die Biegebemessung abgeschlossen. Für die Varianten V1 und V2 war die berechnete Tragfähigkeit jedoch nicht ausreichend, weshalb die Tragfähigkeit der Querschnitte durch eine der folgenden Optionen erhöht werden musste:

1. Erhöhung des inneren Hebelarms der CFK-Spannstäbe durch Erhöhung der Querschnittshöhe
2. Erhöhung des Vorspanngrads durch Erhöhung der Anzahl der Spannstäbe
3. Reduzierung der Vorspannung σ_{pm0}, wodurch sich eine erhöhte Anzahl an erforderlichen CFK-Spannstäben ergibt

Für V1 wurde der Vorspanngrad durch die Verwendung von neun anstatt vier Spannstäben erhöht. Folglich musste die Stegbreite auf 200 mm erhöht werden, um die Einleitung der Spannkraft sicherzustellen. Für V2 wurde eine Kombination der ersten und zweiten Option gewählt. Die Anzahl der Spannstäbe wurde von 10 auf 16 erhöht und die Höhe des Überbaus von 900 auf 950 mm erhöht. Bild 3 und Bild 4 zeigen die resultierenden Querschnitte für beide Varianten.

3 Experimentelle Untersuchungen zur Spannkrafteinleitung

Die im Rahmen der Vorbemessung getroffenen Annahmen bezüglich der Dimensionierung des Spannkrafteinleitungsbereichs müssen mit experimentellen Untersuchungen überprüft und belegt werden. Hierzu wurden in Spannkrafteinleitungsversuchen die minimal erforderlichen Betondeckungen *c* und Abstände *s* der Carbonspannstäbe zur Übertragung der Vorspannkraft ohne Längsrissbildung ermittelt.

3.1 Materialien

Als Beton wurde ein selbstverdichtender Beton mit der Festigkeitsklasse C70/85 des Projektpartners Max Bögl verwendet.
Als CFK-Spannstab wurde ein profilierter Stab des Projektpartners CG TEC mit einem Durchmesser von 10 mm untersucht (Bild 5). Durch die Profilierung erhält die Oberfläche eine Struktur, die zu einer besseren Verbundqualität gegenüber glatten Stäben führt.

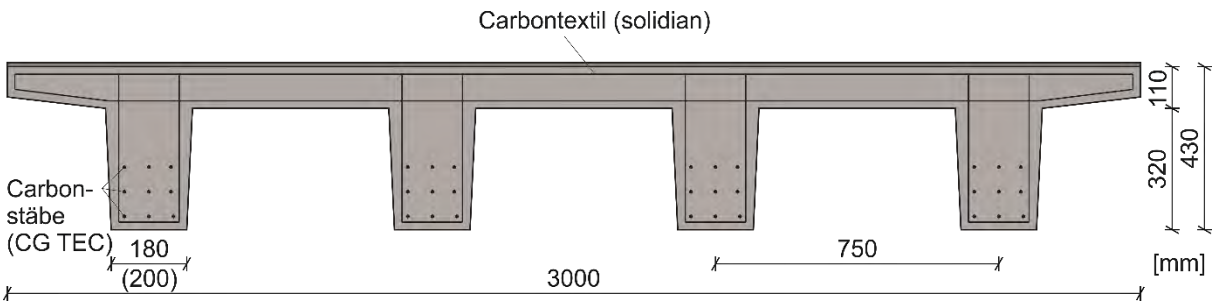


Bild 3 Finaler Querschnitt der Variante 1

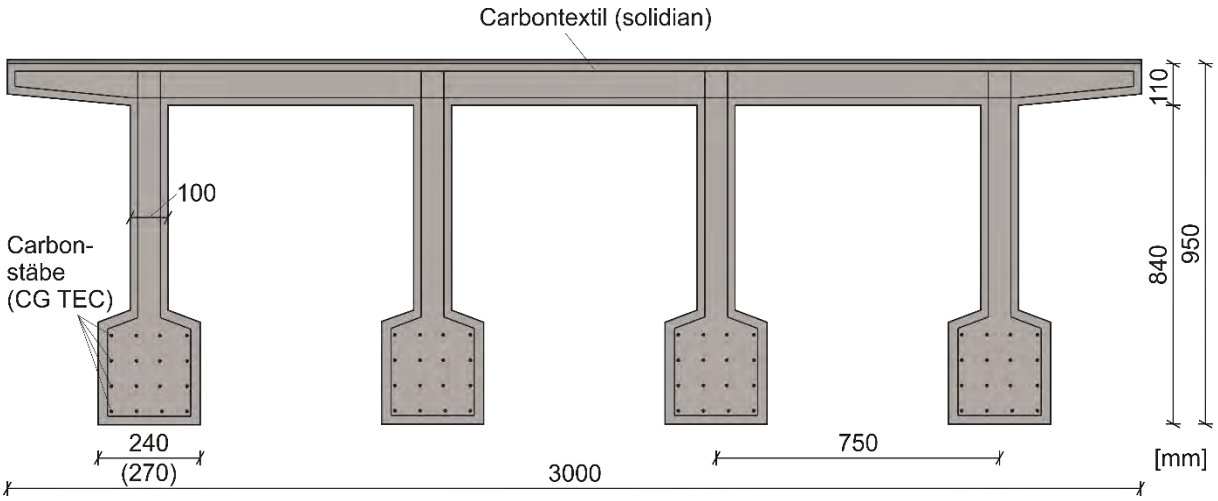


Bild 4 Finaler Querschnitt der Variante 2

Bild 5 Untersuchter CFK-Spannstab

3.2 Versuchsprogramm

Es wurden insgesamt acht Spannkrafteinleitungsversuche mit verschiedenen Balkenquerschnitten durchgeführt. Zu den untersuchten Parametern zählen die erforderliche bezogene Betondeckung c/d_p und Stababstände s/d_p sowie die Anordnung der Spannstäbe in unterschiedlichen Höhenlagen. In Tabelle 3 ist die Versuchsmatrix mit den variierten Parametern zusammengestellt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6 dargestellt. Die CFK-Stäbe wurden mit der in der Vorbemessung ermittelten Vorspannkraft (ca. 75 kN je Stab) vorgespannt. Nach dem Aufbringen der Vorspannkraft wurde der Betonkörper betoniert. Nach einer Erhärtungszeit von einem Tag wurde die Vorspannung in fünf gleichmäßigen Stufen langsam abgelassen. Bei jeder dieser Laststufen wurden die Betondehnungen entlang der Stabachse mit Setzdehnungsmessern (SDM) bestimmt. Zusätzlich wurde mit induktiven Wegaufnehmern (IWA) der Endschlupf der Spannbewehrung kontinuierlich gemessen.

Tabelle 3 Parametervariation und Ergebnisse der Spannkrafteinleitungsversuche

Versuch	Betondeckung	Abstand	Anzahl Stäbe	$f_{c,cyl,1d}$	gerissen	
	c/d_p [-]	s/d_p [-]	[-]	[MPa]	S1	S2
TL1	4	8	2	51,4		
TL2	3	5,75	2			
TL3	2,5	5,75	2	54,8	X	
TL4	5	10,3	2			
TL5	3	3,5	2	52,5	X	X
TL6	3	5,75	2	39,9		
TL7	3	5,75	2			
TL8	3	5,75	4	47,7		
TL9	3	5,75	4			

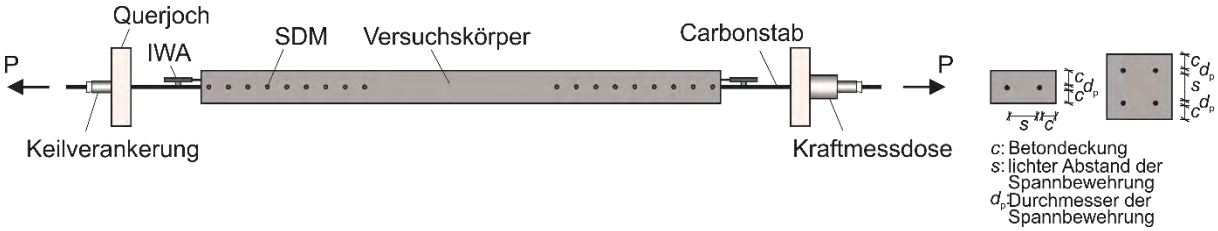


Bild 6 Versuchsaufbau der Spannkrafteinleitungsversuche

3.3 Ergebnisse

Zunächst wurden in den Versuchen TL1 bis 7 die minimale Betondeckung und der minimale Stababstand für eine rissfreie Einleitung der Spannkraft an Versuchskörpern mit zwei Spannstäben ermittelt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass für die untersuchten CFK-Stäbe eine bezogene Betondeckung c/d_p von mindestens 3,0 und ein bezogener Stababstand s/d_p von mindestens 5,75 notwendig sind, um die Spannkraft rissfrei einzuleiten. Anschließend erfolgte eine Überprüfung der ermittelten Mindestabmessungen mit den Versuchskörpern TL8 und TL9, in denen zwei Spanngliedlagen übereinander angeordnet wurden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die ermittelte Mindestbetondeckung und der Stababstand auch für die Einleitung der Spannkraft von Spannstahlgruppen ausreichend sind. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden die im Rahmen der Vorbemessung angenommene Betondeckung ($c/d_p = 2{,}5$) und Stababstände ($s/d_p = 5{,}0$) angepasst. Die resultierenden Querschnittsabmessungen sind in Bild 3 und Bild 4 in Klammern dargestellt.

4 Zusammenfassung

Zu Projektbeginn wurden die Anforderungen an modulare Fußgängerbrücken hinsichtlich Querschnitt, Spannweite und Vorspanngrad definiert und zwei Varianten mit unterschiedlichen Spannweiten festgelegt. Anschließend erfolgte die Vorbemessung der ausgewählten Querschnitte in Anlehnung an Eurocode 2 [5], [6]. Die im Rahmen der Vorbemessung getroffenen Annahmen zur Dimensionierung des Spannkrafteinleitungsbereichs wurden anschließend in experimentellen Untersuchungen überprüft. Hierzu wurden acht Spannkrafteinleitungsversuche durchgeführt, in denen die Mindestbetondeckung und der Mindeststababstand für eine rissfreie Spannkrafteinleitung ermittelt wurden. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden die Querschnittsabmessungen der beiden Entwürfe angepasst.

5 Literaturverzeichnis

[1] Hegger, J., Goralski C., Kulas, C.: Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton. Beton und Stahlbetonbau, 106 (2011), Nr. 2, S. 64-71

[2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen. Köln: FGSV, 2002

[3] International Federation for Structural Concrete (fib): Guidelines for the design of footbridges. Lausanne: 2005

[4] DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Berlin: Beuth Verlag, 2010

[5] DIN EN 1991-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Berlin: Beuth Verlag, 2010

[6] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag, 2011

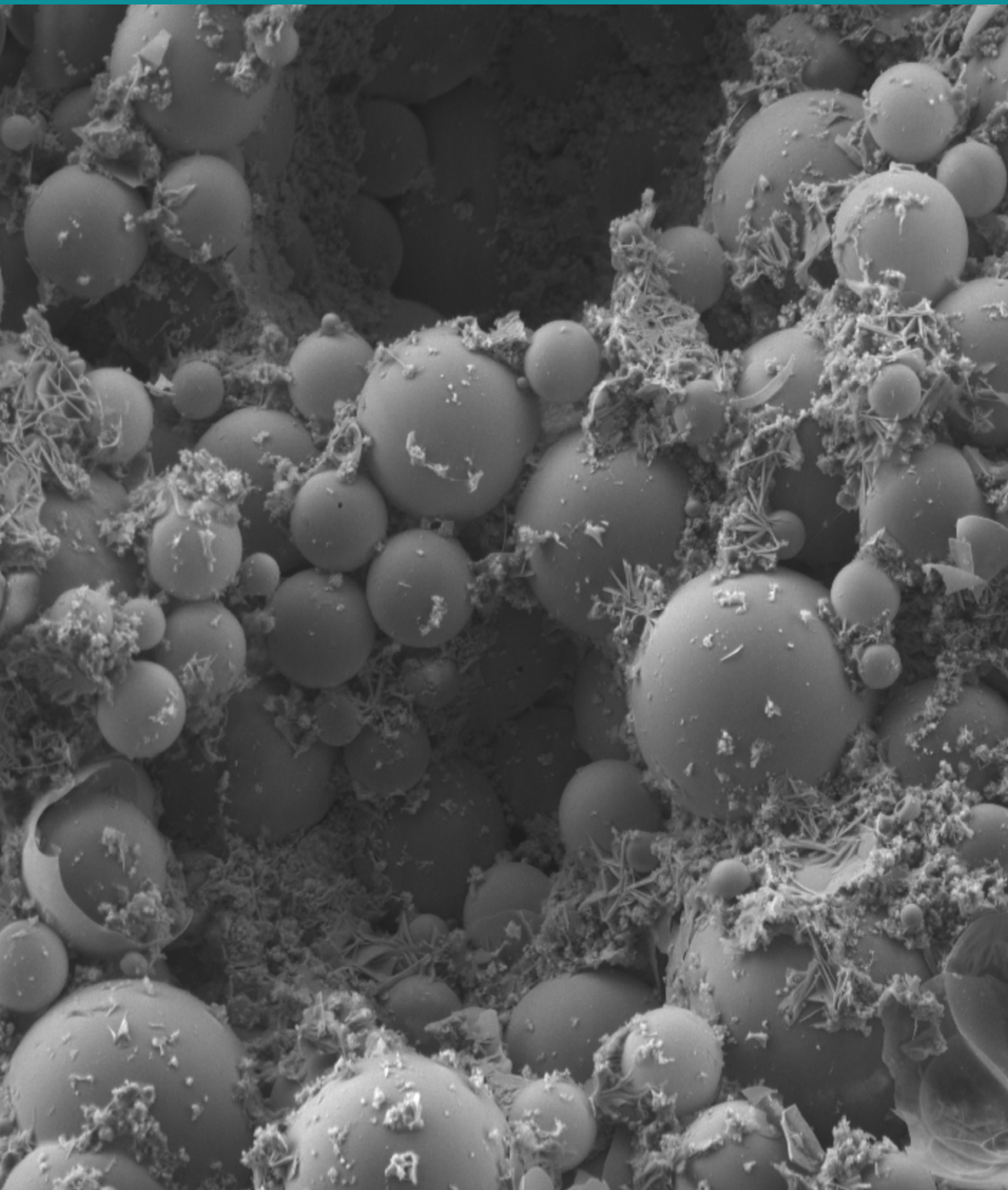
[7] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag, 2011

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des BMBF unter den FKZ 13N13536, 13N13537 und 13N13539 gefördert.

solidian
CG TEC Innovative Faserverbund Technologie
MAX BÖGL Fortschritt baut man aus Ideen.
ibac Institut für Bauforschung Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite
RWTH AACHEN UNIVERSITY
IMB Lehrstuhl und Institut für Massivbau
RWTH AACHEN UNIVERSITY

EcoSphere

HighTech MatBau



Mikro-Hohlglaskugeln als Basis energieeffizienter Dämmung von Gebäuden

Sebastian Lehmann, Laura Schwinger, Benedikt Scharfe, Thorsten Gerdes, Universität Bayreuth,
Markus Ehrhardt, Christin Riechert, Hans-Bertram Fischer, Universität Weimar, Achim Schmidt-Rodenkirchen, InVerTec, Friedbert Scharfe, Maxit, Friedrich Wolff, 3M

Kurzfassung: Trotz ihrer Vielfalt besitzen aktuelle Dämmsysteme, bedingt durch die eingesetzten Werkstoffe, oft über das primäre Ziel der Dämmung hinausgehende unzulängliche oder sogar problematische Eigenschaften. Darunter fallen beispielsweise Wärmebrücken. Offene Fragen bestehen zudem zur Rezyklierbarkeit und zum Brandverhalten. Mögliche Lösungen sind eine Angleichung der Wärmeleitfähigkeiten durch Einsatz von Komposit-Werkstoffen bzw. rein mineralischen Dämmstoffen, wenn vergleichbar gute mechanische und dämmende Eigenschaften erreicht werden.
Innerhalb des Projekts EcoSphere wurden Komposite aus Mikrohohlglaskugeln und -polymeren oder mineralischen Baustoffen entwickelt, die sich durch sehr gute Dämm- und Verarbeitungseigenschaften auszeichnen. Ein Schwerpunkt der Entwicklung war die Optimierung der mechanischen und dämmenden Eigenschaften durch Funktionalisierungen der Kugeloberflächen.

Stichworte: Wärmedämmung, Mikrohohlglaskugeln, energetische Sanierung, sprühfähiges Dämmsystem

1 Motivation und Zielsetzung

Die von der Bundesregierung formulierten Klimaziele sehen bis 2050 einen um 80 % gesenkten Primärenergiebedarf im Gebäudebereich gegenüber dem Stand von 2008 vor. Mit fast 40 % trägt in Deutschland der Gebäudebereich maßgeblich zum Endenergieverbauch bei. Etwa 60 % davon entfällt auf die vorhandenen knapp 19 Mio. Wohngebäude, da über zwei Drittel dieses Gebäudebestands vor 1979 gebaut wurden – noch ohne Regelung zum Wärmeschutz [1]. Eine energetische Ertüchtigung im Bereich der Wärmedämmung bietet somit ein hohes Energieeinsparpotential bei der Erreichung der formulierten Klimaziele.
Ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Wärmedämmeigenschaften ist die Wärmeleitfähigkeit (nach DIN 4108-4). Niedrige Wärmeleitfähigkeiten erlauben nicht nur verbesserten Wärmeschutz, sondern auch Materialeinsparungen durch reduzierte Dämmungsdicken.

Typische eingesetzte Dämmstoffe weisen Wärmeleitfähigkeiten $\lambda < 0{,}05 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$ auf [2]. Dazu zählen u. a. kostengünstige EPS-Hartschaumdämmstoffe mit einem Marktanteil von 30% [3]. Jedoch ist deren Gesamtenergiebilanz unter Berücksichtigung der Herstellung und Entsorgung wenig effizient. Zudem kann es an Fassaden mit polymeren Dämmstoffen zu Veralgung und Schimmelbildung kommen und sie weisen im Brandfall ein nicht zu vernachlässigendes Gefährdungspotential auf [4].
Eine gute Alternative bieten Wärmedämmputze, deren Marktanteil ist mit 5 % jedoch noch relativ gering. Dies begründet sich in oftmals noch nicht ausreichenden Verarbeitungs- und Dämmeigenschaften. Zwei Drittel der Wärmedämmputze werden zudem mit organischem Leichtfüllstoffen (z. B. EPS Kugeln) versetzt, wodurch sich wieder Probleme hinsichtlich Recycling und Brandschutz ergeben können. Anorganische Füllstoffe, wie Aerogele oder Blähglasgranulate kommen langsam in den Markt, benötigen aber entweder ebenfalls einen hohen Energiebedarf in der Herstellung, sind zu teuer oder weisen zu geringe Festigkeiten auf [2].

Tabelle 1 Übersicht der eingesetzten Borosilikatglas-MHGK und ihrer wichtigsten Eigenschaften

Typbezeichnung	Dichte	Isostatische Druckfestigkeit	Mittlerer Durchmesser	Wärmeleitfähigkeit
iM16K	0,46 g/cm³	110 MPa	20 µm	0,143 W/Km
S38HS	0,38 g/cm³	38,5 MPa	45 µm	0,118 W/Km
L-22951	0,32 g/cm³	41 MPa	25 µm	0,100 W/Km
S28HS	0,28 g/cm³	21 MPa	30 µm	0,088 W/Km

Zielsetzung des Projekts EcoSphere war die Entwicklung einer Produktfamilie auf Basis von Mikrohohlglaskugeln (MHGK), die neben sehr guten Dämmeigenschaften eine bisher nicht erreichbare Kombination von Materialeigenschaften aufweisen:

- Deutlich reduzierte Wärmeleitfähigkeit gegenüber vergleichbaren Produkten auf Basis von Schaumgläsern
- Passives Feuchtemanagement zur Vermeidung von Veralgung/Schimmelbildung sowie Reduzierung des Wärmetransportes durch den Baustoff
- Vorwiegend mineralische Bestandteile, die ein vollständiges Recycling ermöglichen
- Vermeidung von Emissionen (VOC, POC) während der Lebensdauer und beim Recycling
- Verbesserung der rheologischen Eigenschaften bei der Baustoffverarbeitung
- Langzeitstabilität und kostengünstige Herstellung

2 Ergebnisse

Innerhalb von EcoSphere wurden Mikrohohlglaskugeln (MHGK) aus Borosilikatglas zur Verbesserung von Dämm- und Materialeigenschaften sowohl in Polymeren als auch Wärmedämmputzen eingesetzt (Tabelle 1). Als Qualifizierungsmerkmal wurde eine ausreichende Festigkeit von mindestens 20 MPa bei gleichzeitig niedriger Dichte festgelegt. So können eine Minimierung der Bruchrate bei der Verarbeitung und eine geringe Dichte des Gesamtsystems in den Anwendungen erreicht werden.

2.1 Entwicklung und Verarbeitung MHGK-haltiger Polymere

In Wärmedämmverbundsystemen (WDVS), z. B. bei Polypropylen(PP)-Befestigungssystemen (Dübel) für EPS-Dämmplatten, bilden sich aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten unerwünschte Wärmebrücken. Wie in Bild 1 gezeigt, konnte durch den Einsatz von verschiedenen Sorten und Volumengehalten an MHGK als Füllstoff in PP-Matrizen eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit um bis zu 20 % erreicht werden. Durch die damit verbundene Annäherung an die Wärmeleitfähigkeit von etwa $0{,}03\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$ von EPS-Systemen können Wärmebrücken zumindest reduziert werden.

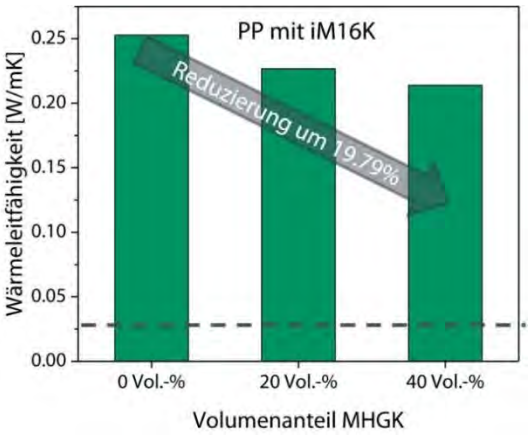


Bild 1 Mittels Hot-Disc-Verfahren bestimmte Wärmeleitfähigkeiten von Kompositen aus MHGK (Typ iM16K) und PP mit verschiedenen Volumenfüllgraden

Um durch die Zugabe der MHGK die mechanische Stabilität des Verbundsystems nicht zu gefährden, erfolgte eine Verbesserung der Anbindung zwischen Füllstoff und Matrix. Durch den Einsatz des Haftvermittlers Maleinsäureanhydrid (MAH) in der PP-Matrix sowie einer Silanisierung der MHGK mit einem Aminosilan wurde eine stabile chemische Bindung zwischen den Komponenten erreicht. In Bild 2 ist anhand des Vergleichs von Zugfestigkeiten von gefüllten und ungefüllten PP-Matrizen die erfolgreiche mechanische Stabilisierung demonstriert. Da sich der Einsatz von MHGK zur Verbesserung der wärmeleitenden Fähigkeiten in PP-Matrizen als ebenso erfolgreich erwies wie die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch die Silanisierung, erfolgte eine Skalierung vom Labor- in den Pilotanlagenmaßstab.

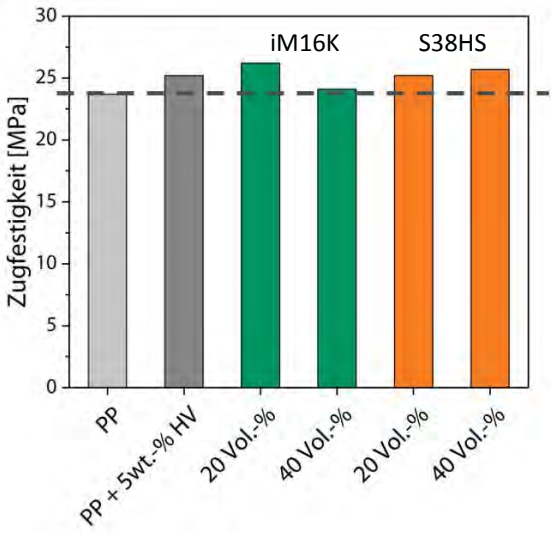


Bild 2 Vergleich der Zugfestigkeiten für PP und PP mit Haftvermittler (HV) mit verschiedenen Kompositen aus PP und MHGK (Typ iM16K, grün bzw. Typ S38HS, orange)

Sowohl ein kontinuierliches Beschichtungsaggregat für MHGK als auch ein Extrusionssystem für MHGK-haltige PP-Rohre wurden entwickelt und beim Projektpartner 3M installiert. Verglichen zu einem Standard-PP-Rohr (Borealis RA130E) konnten erfolgreich MHGK-haltige PP-Rohre mit 24 % reduzierter Wärmeleitfähigkeit sowie 22 % reduzierter Dichte hergestellt werden.

2.2 Entwicklung und Verarbeitung MHGK-haltiger Putze

Als Alternative zu EPS-haltigen Baustoffen wurden innerhalb von EcoSphere MHGK als Leichtfüllstoffe in Putzen eingesetzt, um rein mineralische Wärmedämmsysteme für den Außen- und Innenbereich im Gebäudesektor zu erhalten.
Durch Modifizierung des mineralischen Bindemittelsystems konnten eine hohe Volumenstabilität, ein gutes Austrocknungsverhalten und eine hervorragende Verarbeitbarkeit erreicht werden (Bild 3 und Bild 4).
Neben der Verarbeitbarkeit muss eine hohe Dauerhaftigkeit von MHGK-Putzsystemen gewährleistet sein. Hierzu wurden, angelehnt an den AKR-Performance- und den CIF-Test, Prüfbedingungen und -richtlinien für Tests der Stabilität der MHGK und des Gesamtsystems gegen einen lösenden Angriff sowie der Frost-Tau-Beständigkeit erarbeitet.

Bild 3 Applikation des sprühfähigen MHGK-Dämmsystems

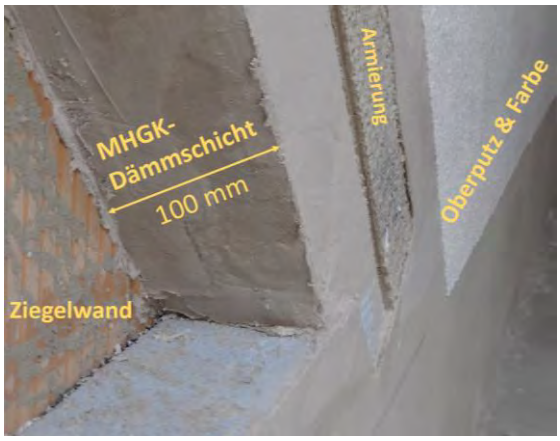


Bild 4 Querschnitt am Demonstrator: Auf einer Ziegelwand aufgebrachte Dämmschicht (Dicke 100 mm) mit Armierung, Oberputz und Farbe

Diese wurden deutlich schärfer gewählt als im realen System zu erwarten und umfassen

- Stabilität MHGK:
  Lagerung der MHGK von 90 Tagen bei 60 °C und pH-Werten bis zu 13,5
- Stabilität Gesamtsystem:
  Lagerung der MHGK-Putze für mehrere Tage im Trockenschrank bei 40 °C, wobei eine Seite ständigen Kontakt zu nachströmendem deionisiertem Wasser hat und die gegenüberliegende Seite zur Verdunstung frei bleibt. Aufgelöste Bestandteile würden somit an der freien Oberfläche auskristallisieren.
- Frost-Tau-Beständigkeit:
  Lagerung von Probekörpern im Wasser mit anschließenden Temperaturwechseln von -20 bis +20 °C

Die Prüfungen belegen, dass das finale Mischungskonzept eine hohe Dauerhaftigkeit gegenüber lösenden Angriffen sowie eine sehr gute Frost-Tau-Beständigkeit aufweist (Bild 5 und Bild 6).

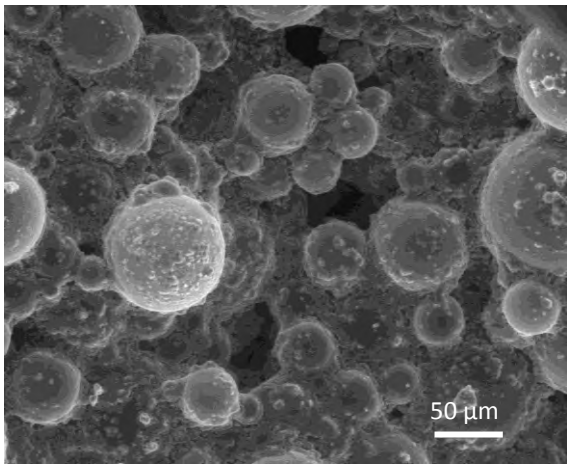


Bild 5 Intakte MHGK nach lösendem Angriff (Putzmatrix mit 85 Vol.-% MHGK)

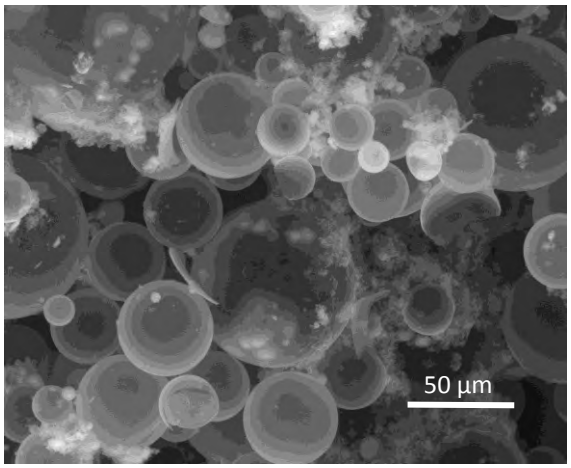


Bild 6 Intakte MHGK nach Frostangriff Angriff (Putzmatrix mit 85 Vol.-% MHGK)

Für das entwickelte sprühfähige Dämmsystem wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $0{,}04\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$ ermittelt. Bild 7 zeigt einen Vergleich des im Projekt entwickelten Dämmsystems mit gängigen Dämmsystemen.

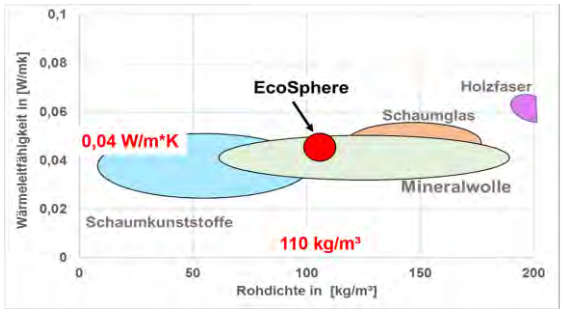


Bild 7 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit des entwickelten sprühfähigen Dämmsystems mit gängigen Dämmmaterialien (nach [5])

Neben der Materialentwicklung erfolgte zusätzlich eine vergleichende Life-Cycle-Analysis (LCA) mit kommerziellen EPS- und Standardputzen. Als Bezugsgröße für die unterschiedlichen Dämmsysteme wurde ein U-Wert von $0{,}15\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{Km^2}}$ gewählt. Wie Bild 8 zu entnehmen ist, ergibt sich für das entwickelte sprühfähige Dämmsystem eine deutliche Reduktion im Materialbedarf. Beim Energiebedarf pro Fläche und Jahr ergeben sich unter Berücksichtigung der erwarteten Lebensdauer und der Menge an Leichtzuschlag vergleichbare Werte zu EPS-Systemen. Der Vorteil gegenüber diesen ist jedoch die vollständige Rezyklierbarkeit des entwickelten Dämmsystems aufgrund der rein mineralischen Zusammensetzung.

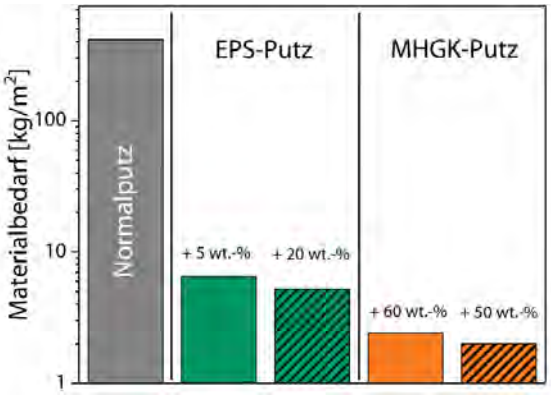


Bild 8 Vergleichender Materialbedarf für verschiedene Putzzuschläge für einen U-Wert von $0{,}15\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{Km^2}}$

2.3 Funktionalisierung der MHGK

Sowohl die Eigenschaften der MHGK selbst als auch der Verbundstoffe können durch Funktionalisierung der Kugeloberflächen angepasst werden. Als ein Beispiel wurde in Kapitel 2.1 bereits die verbesserten mechanischen Eigenschaften der PP-MHGK-Matrizen durch die Silanisierung der MHGK-Oberflächen beschrieben.

Ein weiterer innerhalb von EcoSphere verfolgter Ansatz ist die Modifikation der Reflexionseigenschaften von MHGK. So kann z. B. durch metallische Beschichtung eine erhöhte Reflexion im IR-Bereich von 10 bis 20 µm erzielt werden, wodurch bei Verwendung von MHGK-haltigen Innenputzen eine Absenkung der Raumtemperatur und somit eine Energieeinsparung möglich wird [6]. Silberbeschichtete Kugeln weisen gute Reflexionseigenschaften auf. Nachteile sind hohe Materialkosten und eine schlechte Rezyklierbarkeit als Farbadditiv [6]. Im EcoSphere-Projekt wurde daher alternativ das Reflexionsverhalten von mittels PVD-Verfahren aluminiumbeschichteten MHGK mit FTIR-Spektroskopie untersucht (Bild 9).

Die Reflexion konnte mit steigender Aluminiumschichtdicke um bis zu 30 % gegenüber unbeschichteten Kugeln erhöht werden. Bei einer Schichtdicke von 33 nm Aluminium konnte die Reflexion von als Benchmark herangezogenen kommerziell erhältlichen silberbeschichteten Kugeln (SiLi Typ S) erreicht werden. Eine Einsatzmöglichkeit für solche funktionalisierten MHGK bieten beispielsweise Wandfarben.

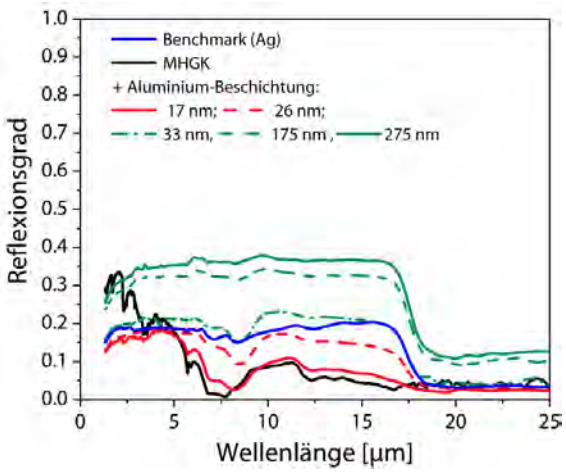


Bild 9 Reflexionsverhalten von verschieden beschichteten MHGK im IR

3 Zusammenfassung

Im Projekt EcoSphere wurden zwei Gruppen von MHGK-haltigen Dämmstoffen entwickelt:

1. MHGK-PP-Komposite:
   PP-Befestigungssysteme für EPS-Platten wurden zu MHGK-PP-Kompositen mit verbesserter mechanischer Stabilität weiterentwickelt. Die um 20 % niedrigere Wärmeleitfähigkeit der Komposite erlaubt eine Reduzierung von Wärmebrücken. Der hohe Informationsgewinn hinsichtlich der Verarbeitbarkeit von MHGK-Polymeren wurde auf die Herstellung von Rohren übertragen. Deren Dichte und Wärmeleitfähigkeiten konnten ebenfalls um mehr als 20 % reduziert werden.
2. MHGK-Mörtel-Komposite
   Mit der Entwicklung des auf MHGK basierenden sprühfähigen Dämmsystems wurde für den Bereich der Wärmedämmung von Gebäuden ein leicht zu verarbeitendes Materialsystem mit einer sehr guten Wärmeleitzahl von $0{,}04\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{Km}}$ entwickelt. Aufgrund der rein mineralischen Zusammensetzung zeichnet es sich gegenüber EPS-Systemen zudem durch eine vollständige Rezyklierbarkeit aus. Für das sprühfähige Dämmsystem sind zukünftig bereits großflächige Anwendungen vorgesehen. So erfolgt u. a. die Weiterentwicklung und Skalierung im BMWi Projekt »Energetische Modernisierung des genossenschaftlichen Wohnquartiers Margaretenau in Regensburg (MAGGIE)«.

Für beide Gruppen MHGK-haltiger Dämmstoffe wurden anwendungsrelevante Demonstratoren entwickelt.

4 Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Sanierungsbedarf im Gebäudebestand, Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. München: PRpetuum GmbH, 2014

[2] Sprengard, Christoph; Treml, Sebastian; Holm, Andreas H.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2014

[3] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): BBSR-Berichte kompakt – Künstliche Mineralfaserdämmstoffe. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2011

[4] Dunkelberg, Elisa; Weiß, Julika: Ökologische Bewertung energetischer Sanierungsoptionen, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 4., Berlin, 2016

[5] Wesche, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile 1: Grundlagen Baustoffkenngrößen, Meß- und Prüftechnik, Statistik und Qualitätssicherung (3. Auflage). Wiesbaden: Bauverlag, 1996

[6] Willert-Porada, Monika (Hrsg.): Multifunktionale Werkstoffe aus Glas für energieeffiziente Gebäudetechnologien. Bayreuth: FORGLAS, 2012

- DIN 4108-4 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Deutsche Fassung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des BMBF unter den FKZ 13N13186 bis 13N13189 gefördert.

ECWin2.0

Smart Windows der 2. Generation

EControl-Glas GmbH & Co. KG, Plauen, Universität Würzburg, Institut für Chemische Technologie der Materialsynthese, Würzburg, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg, GfE-Fremat GmbH, Freiberg, Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig, KS Kunststoffbau GmbH, Groß Kienitz

Kurzfassung: Mit schaltbaren Gläsern kann der Energieeintrag von der Sonne in ein Gebäude gesteuert werden. Dies führt zu deutlichen Einsparungen bei der Gebäudekühlung bis zur Abschaffung von Klimaanlagen, erspart einen außenliegenden Sonnenschutz und führt zur Verbesserung des Wohnkomforts. Das Ziel des Projektes ECWin2.0 ist die Schaffung der materialtechnischen Voraussetzungen für die Herstellung eines neuen Typs preiswerter, dimmbarer Verglasungen mit verbesserten Eigenschaften gegenüber dem Stand der Technik. Gleichzeitig wird die Wertschöpfungskette von den Rohstoffen bis zur fertigen Verglasung aufgebaut. Zur Erreichung des Zieles werden neue innovative Beschichtungsmaterialien sowie Verfahren zur Herstellung dieser Beschichtungen demonstriert. Diese neuartigen Materialien werden über spezielle Abscheidetechniken auf Glasscheiben aufgebracht, die in Kombination mit einem polymerbasierten Elektrolyten zu einem Verbundglas und weiter zu Isolierglas veredelt werden. Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Materialien wird in ihrer Funktion und Wirkung erforscht und getestet.

Stichworte: Schaltbares Glas, Elektrochromie, Energieeffizienz in Gebäuden, Metallo-Polyelektrolyte, Preußisch Blau, Hochvakuumbeschichtung

1 Einleitung

Das Projekt »Smart Windows der 2. Generation« (ECWin2.0) forscht an der Etablierung einer elektrochromen Verglasung der 2. Generation für den Architekturbereich.
Dem gegenüber steht eine 1. Generation schaltbarer Gläser, die bereits am Markt etabliert ist. Ein wesentlicher Nachteil dieser 1. Generation ist im derzeitigen Marktpreis zu sehen (vor allem bedingt durch die Rohstoffpreise und hohe Prozesskosten). Darüber hinaus zeigen die bisher verwendeten Materialien eine eingeschränkte Lichtmodulation.
Bei einer durch schaltbare Gläser technisch erreichbaren Gesamtenergietransmission von 12 % (im gefärbten Zustand) ergeben Berechnungen, dass auf eine Klimatisierung komplett verzichtet werden kann [1]. Neben den Einsparungen an Kühlenergie in den Sommermonaten erlaubt das neue Konzept, den Energie-Transmissionsgrad (g-Wert) im hellen Zustand von heute 40 % (Stand der Technik, 1. Generation) um 10 %-Punkte auf ca. 50 % zu erhöhen.

Die Innovation in diesem Vorhaben besteht in der Erforschung neuartiger metallo-polymerer Schichten in Verbindung mit Schichten auf Basis von Preußisch Blau (PB) und neuartiger binärer und/oder ternärer metalloxidischer Schichten.

2 MEPE/PB Verbundgläser

In dem Projekt »Smart Windows der 2. Generation (ECWin2.0)« sollen elektrochrome Glaselemente auf der Basis neuartiger Materialien, sog. metallosupramolekularer Polyelektrolyte (MEPE), getestet werden, die sich für einen Einsatz in elektrisch schaltbaren Architekturverglasungen eignen könnten. MEPE weisen hohe Färbeeffizienzen sowie kurze Schaltzeiten auf und können mittels einfacher nasschemischer Herstellungsprozesse (z. B. Tauchbeschichtung) hergestellt werden [2]. Durch Variation des Metall-Zentrums und/oder des Liganden lässt sich die Farbe der MEPE variieren [3].

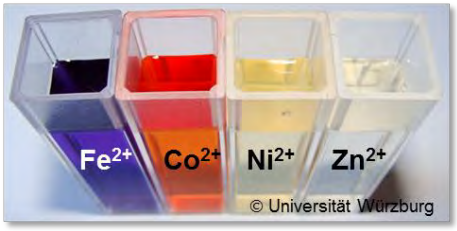


Bild 1 Farbvariation der MEPE durch Austausch des Metall-Ions.

Ausgehend von Fe-MEPE, das reversibel von blau nach farblos schaltet, sollen in Kooperation mit der Universität Würzburg neue MEPE-Systeme sowie geeignete Gegenelektroden entwickelt und getestet werden. Ein interessantes Material für den Einsatz als Gegenelektrode in MEPE-basierten elektrochromen Elementen ist PB, das als Farbpigment bekannt ist und komplementär zu Fe-MEPE schaltet. Wie in Bild 2 zu sehen ist, bestehen elektrochrome Glaselemente im Allgemeinen aus einer Arbeitselektrode (z. B. Fe-MEPE), einer Gegenelektrode (z. B. PB) und einem ionenleitenden, elektrisch isolierenden Elektrolyten. Die beiden Elektroden sind über einen metallischen Kontakt mit einer externen Spannungsquelle verbunden und können so geschaltet werden. Die Gegenelektrode kann entweder als reine Ionenspeicherschicht fungieren oder, wie im Falle von PB, ebenfalls elektrochrome Eigenschaften aufweisen. Die in diesem Projekt eingesetzten MEPE- und PB-Elektroden werden am Fraunhofer ISC mittels geeigneter Beschichtungsverfahren auf transparente, leitfähige Gläser aufgebracht und schließlich in Kombination mit einem polymerbasierten Elektrolyten von EControl-Glas zu Verbundgläsern verbaut.

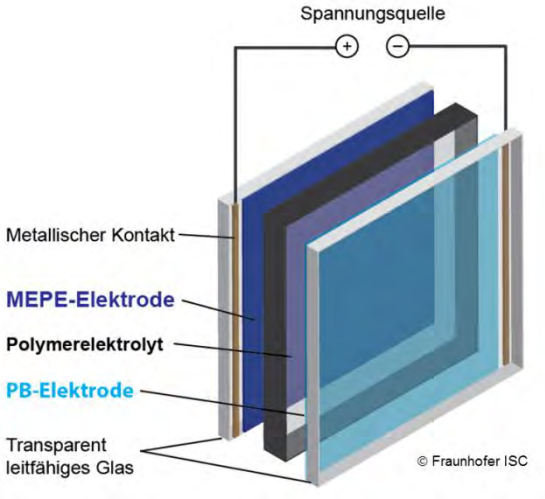


Bild 2 Schematischer Aufbau eines MEPE-basierten elektrochromen Glaselements.

Dabei steht vor allem das Zusammenwirken der unterschiedlichen Materialien im Fokus der optischen und elektrochemischen Untersuchungen, die im Rahmen des Projekts an kleinen (10 x 10 cm²) bis mittelgroßen Demonstratoren (bis 40 x 60 cm²) durchgeführt werden.
Die bisher hergestellten MEPE/PB-Verbundgläser weisen eine sehr hohe Schichthomogenität ($\Delta E < 2$) und Transparenz (Haze < 1 %) auf. Bei Anlegen einer externen Spannung von etwa 2,5 V ändert sich die Farbe der Verbundgläser von tiefblau nach farblos. Je nach eingesetzten MEPE- und PB-Elektroden lassen sich visuelle Transmissionsunterschiede $\Delta\tau_v > 55$ % erzielen, wobei die Schaltdauer nur wenige Minuten beträgt (bei einer Größe von 30x40 cm²). Die Ein- und Entfärbevorgänge verlaufen aufgrund der geringen Ionenleitfähigkeit des Polymerelektrolyten sehr gleichmäßig (kein „Vorhang-Effekt«).

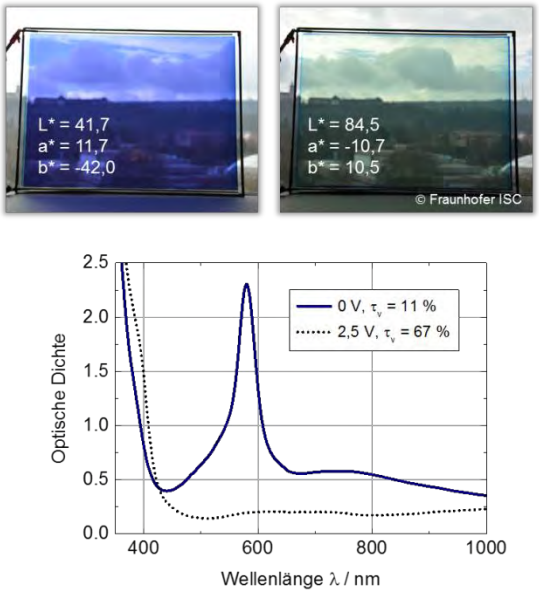


Bild 3 Schaltverhalten eines MEPE/PB Verbundglases mit Polymerelektrolyt.

Nach den ersten erfolgreichen Zyklenstabilitätstests sind im weiteren Projektverlauf zudem beschleunigter Alterungstests geplant, die zeigen werden, ob diese neuartigen elektrochromen Materialien für schaltbare Verglasungen geeignet sind.

3 Neuartige Gegenelektroden

Für den klassischen Aufbau elektrochromer schaltbarer Verglasungen werden bei EControl-Glas an Stelle von organischen Elektroden anorganische Materialien verwendet. Als Aktivschicht wird Wolf-

ramoxid (WO_3) und als Gegenelektrode werden andere Mischoxide verwendet. Durch Anlegen einer Spannung werden Lithium-Ionen in die Aktivschicht eingelagert, wobei sie sich dunkel färbt (sog. kathodisches Schaltverhalten). Durch Umpolen der Spannung diffundieren die Lithium-Ionen aus der Aktivschicht über den Elektrolyten in die Gegenelektrode. Hierbei hellt sich die Aktivschicht wieder auf. Idealerweise zeigt die Gegenelektrode ein gegenläufiges, anodisches Schaltverhalten, d. h. Aufhellung bei Lithium-Einlagerung und umgekehrt. Ein derartiges anodisches Schaltverhalten ist nur für eine Reihe von Oxiden der Übergangsmetalle bekannt: Cr, Co, Mn, Ni, V, Ir, Fe und Ru [4]. Hierbei scheiden Iridium und Ruthenium aus Kostengründen für einen großflächigen Einsatz aus. Iridiumoxid (IrO_2) kommt z. B. nur auf kleiner Fläche in schaltbaren Autospiegeln zum Einsatz. Weitere Randbedingungen sind der erreichbare optische Kontrast, die Zyklenstabilität, der Farbeindruck und Gesundheitsaspekte der Materialien.

In dem Verbundprojekt »ECWin2.0« werden gemeinsam mit den Projektpartnern EControl-Glas und GFE Fremat als zweite Projektroute neuartige Gegenelektroden entwickelt. Hierbei wird der Ansatz verfolgt, die bestehende Gegenelektrode aus einem binärem Mischoxid (MNO_x) durch Zusatz oben genannten Materialien zu modifizieren, wodurch insbesondere das Schaltverhalten und der Farbeindruck (derzeit leicht gelb) verbessert werden soll. Die neuen Mischoxide werden am Fraunhofer IST mittels reaktivem Ko-Sputtern von drei Sputterquellen hergestellt.

Die Beurteilung der Lithiumaufnahmefähigkeit erfolgt mittels Zyklovoltammetrie. Parallel dazu werden die visuelle Transmission und deren Änderung während des Redoxvorgangs gemessen. Nach ersten orientierenden Abscheidungen der reinen Oxide, z. B. Chromoxid (Bild 4), wurden unterschiedlichste Mischungen realisiert.

Bild 4 Gegenelektrode, Aufbau: Glas/transparente leitfähige Schicht/Metalloxid.

Die erfolgreichste Mischung zeigt dabei über weite Bereiche das gewünschte anodische Schaltverhalten (Bild 5).

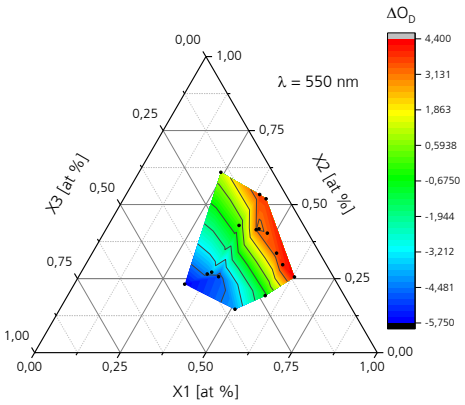


Bild 5 Änderung der optischen Dichte (ΔOD) in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der metallischen Bestandteile der Gegenelektrode.

Die optische Dichte (OD) nimmt bei Lithium Einlagerung ab (ΔOD < 0), d. h. die Schicht hellt auf. Gleichzeitig weisen die Schichten eine ausreichende Lithium-Aufnahmefähigkeit auf.

Derzeit werden die erfolgreichsten Mischoxide hinsichtlich ihrer Zyklenbeständigkeit untersucht und im Verbund mit der WO_3 getestet. Weiterhin sind Tests auf größerer Fläche im Technikumsmaßstab 30 · 40 cm^2 geplant.

4 Literaturverzeichnis

[1] S. Schlitzberger, Ch. Kempkes »Durchführung von Simulationsrechnungen zur vergleichenden Bewertung der dimmbaren Verglasung ECONTROL«, Projektbericht Ing. Büro Prof. Dr. Hauser GmbH, 02/2012.

[2] M. Schott, H. Lorrmann, W. Szczerba, M. Beck, D. G. Kurth: State-of-the-art electrochromic materials based on metallo-supramolecular polymers. Solar Energy Materials & Solar Cells, 126 (2014), 68-73.

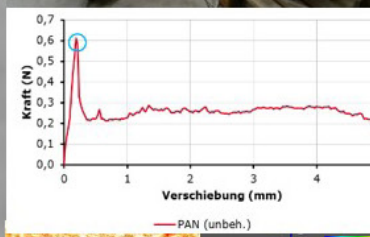
[3] F. S. Han, M. Higuchi, D. G. Kurth: Metallo-Supramolecular Polymers Based on Functionalized Bis-terpyridines as Novel Electrochromic Materials. Advanced Materials, 19 (2007), 3928-3931.

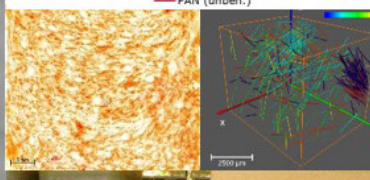
[4] C. G. Granqvist, Electrochromics for smart windows: oxide-based thin films and devices, Thin Solid Films 564 (2014), 1–38.

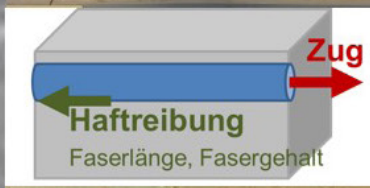
Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des BMBF unter den FKZ 13N13372 bis 13N13376 und 13N13651 gefördert.

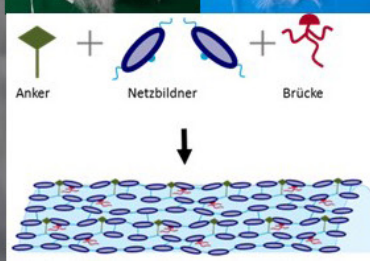
Funktional-faser

KMU-innovativ Mittelstand









Funktionalisierung von Polymerfasern

Ein Beitrag der Tensidchemie für dauerhafte zementgebundene Werkstoffe

Natalia Rachmatulin, André Gardei, Julia v. Werder, Birgit Meng, Bundesanstalt für Materialforschung
Julia Süßmuth, Andreas Gerdes, Detlef Ballschuh, Horst Seibt, IONYS AG

Kurzfassung: Im Gegensatz zur Druckfestigkeit weisen zementgebundene Werkstoffe i. a. nur geringe Zugfestigkeiten auf. Ein Weg, Zugfestigkeiten zementgebundener Werkstoffe zu erhöhen und Rissbildung aufgrund von Zugspannungen zu verringern, besteht in der Einarbeitung von Fasern, die diese Spannungen aufnehmen. Häufig eingesetzt werden Stahlfasern, obwohl synthetische Polymerfasern leichter und meist beständiger gegenüber chemischen Angriffen und Korrosion sind. Die Polymerfasern zeigen allerdings meist einen deutlich schwächeren Haftverbund, was an der hydrophoben Faseroberfläche liegt. Um nun eine Anbindung der Fasern an die mineralische Matrix zu erreichen, müssen die Faseroberflächen modifiziert werden, ohne dass die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst werden. Eine Herausforderung besteht somit in einer Oberflächenmodifikation durch eine schonende Behandlung der Fasern zur Erzeugung von anbindungsfähigen Gruppen. Durch eine Behandlung von modifizierten Fasern mit geeigneten Polymerlösungen werden die Oberflächeneigenschaften verändert und erlauben eine Anbindung an die Zementsteinmatrix. Der Einsatz von Tensiden als grenzflächenaktive Verbindungen ermöglicht in diesem Zusammenhang eine Vermittlung zwischen Polymeroberflächen und mineralischen Werkstoffen.

Stichworte: zementgebundene Baustoffe, Lichtmikroskopie, Röntgen-3D-Computertomographie, Einzelfaserdurchzugsversuch, Windkanal, Fasermodifikation, Oberflächenfunktionalisierung, grenzflächenaktive Verbindung

1 Einführung

Ein wesentlicher Nachteil von zementgebundenen Baustoffen ist ihre insbesondere im jungen Alter niedrige Zugfestigkeit. Insbesondere bei Putzen besteht die Gefahr, dass infolge des behinderten Schwindverhaltens die maximale Zugspannung innerhalb der Matrix überschritten wird und es so zur verstärkten Rissbildung kommt.
Zur Verbesserung des Widerstands gegen die zuvor genannten Effekte und damit der Vermeidung einer Rissbildung werden bereits heute an vielen Stellen Fasern eingesetzt. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften dieser Polymerfasern erfolgt die Kraftübertragung zwischen Zementsteinmatrix und Faser primär über den Reibungsverbund.

Zielstellung des Forschungsprojektes ist es deshalb, durch eine Funktionalisierung der Faseroberfläche eine chemische Anbindung der Polymerfasern an die Zementsteinmatrix zu erreichen und somit das Verbundverhalten deutlich zu verbessern.
Aufgabe der BAM war es, die von der Firma IONYS modifizierten Fasern auf ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen.

2 Prinzip der Fasermodifikation

2.1 Grundlagen

Polymerfasern weisen im Allgemeinen unpolare, hydrophobe Oberflächen auf, aus denen Probleme wie »Igelbildung« und »Aufschwimmen« bei der Einarbeitung in zementgebundene Werkstoffe resultieren.

Eine möglichst schonende Modifikation der Fasern kann durch eine Umhüllung mit einem Polymer erreicht werden. Das Polymer muss dabei zum einen mit der Faseroberfläche in Wechselwirkung treten, zum anderen zusätzlich eine Anbindung in die Zementsteinmatrix erlauben, d. h. die hydrophobe Faseroberfläche muss in eine hydrophile umgewandelt werden [1]. Praktisch umgesetzt wird dieser Anspruch dadurch, dass das Polymer mittels eines Tensids – »Brücke« – gleichmäßig auf der Faseroberfläche aufzieht. In das Polymer werden hydrophile Verbindungen – »Anker« – eingebaut, die ein Verankern in der Zementsteinmatrix erlauben. In Bild 1 ist dieser Zusammenhang dargestellt, in Bild 2 ist eine Darstellung des Querschnittes zu finden.

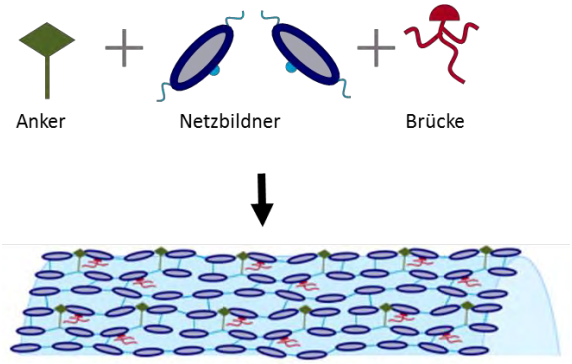


Bild 1 Schematische Darstellung der Fasermodifikation

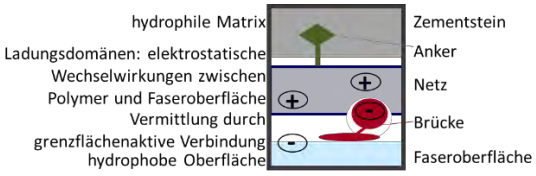


Bild 2 Querschnitt

2.2 Faserpräparation auf molekularer Ebene

Polymerfasern wie bspw. Polyacrylnitrilfasern, PAN-Fasern, verfügen über Gruppen an der Oberfläche, die für die Ausbildung von Ladungsdomänen sorgen, andere dagegen wie bspw. Carbon- oder Polypropylenfasern besitzen keine derartigen Gruppen. In Bild 3 ist das Vorgehen für PAN-Fasern dargestellt. Als Polymer für die Ausbildung des umhüllenden Netzes hat sich Poly-(dimethyldallylammoniumchlorid) als geeignet herausgestellt. Für eine gleichmäßige Verteilung des Polymers kann mit einem ethoxylierten Sulfobetain-(sulfinat) gesorgt werden. Diese grenzflächenaktive Verbindung besitzt sowohl einen polaren Kopf als auch einen unpolaren Schwanz. Dadurch ist sie in der Lage, zwischen der unpolaren Oberfläche und dem zwitterionischen Polymer zu vermitteln. Durch die Einbettung von Natriumsilikat in das Polymer kann sich das Netzwerk in der mineralischen Matrix verankern [2-4].

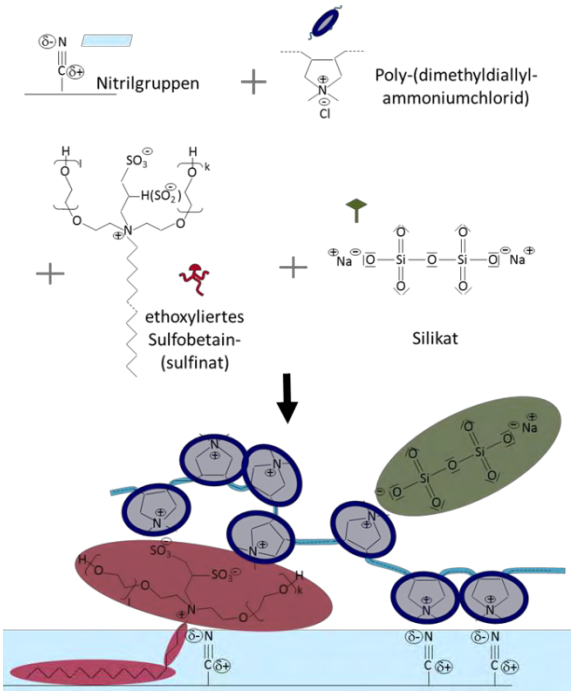


Bild 3 molekulare Darstellung einer Faserpräparation

3 Untersuchungsmethoden Präparation

3.1 Färbeversuche

Ein einfacher, visueller Nachweis der Faserpräparation kann durch einen wasserlöslichen, zwitterionischen Farbstoff erfolgen. Dieser Farbstoff, Patentblau, haftet an hydrophilen, polaren Oberflächen, nicht jedoch an unpolaren Oberflächen. Die Molekülstruktur von Patentblau ist in Bild 4 zu finden.

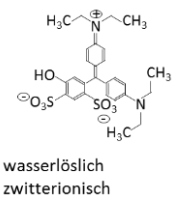


Bild 4 Molekülstruktur Patentblau

Für den optischen Nachweis werden die Fasern in eine Farbstofflösung getaucht und mehrfach gewaschen. Ist die Blaufärbung der Fasern auch nach dem Waschen erkennbar, ist das ein Nachweis für eine erfolgreiche Oberflächenmodifikation der Fasern.

3.2 Infrarotspektroskopie

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung bietet die Infrarotspektroskopie. Elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich geht Wechselwirkungen mit organischen Molekülen ein und bewirkt Molekülschwingungen, die charakteristisch für das betreffende Molekül sind. Die infrarote Strahlung regt Schwingungen bestimmter, IR-aktiver Gruppen in einer für sie charakteristischen Wellenlänge an. Dabei wird die Intensität der Strahlung beim Durchgang durch die Probe durch Adsorption abgeschwächt. Für ein Adsorptionsspektrum wird üblicherweise die Adsorption als Funktion der Wellenzahl, einem Kehrwert der Wellenlänge in der Einheit cm^{-1}, aufgetragen. Das Spektrum setzt sich aus den Adsorptionsbanden der einzelnen funktionellen Gruppen und des gesamten Moleküls zusammen. Bei der Attenuated Total Reflection-, ATR-Spektroskopie handelt es sich um eine spezielle Art der Infrarot-, IR-Spektroskopie. Die Probe wird nicht durchstrahlt, sondern die Strahlung wird durch die Messanordnung an der Grenzfläche zwischen einem Kristall, bspw. Diamant, und Probe reflektiert und verstärkt und ermöglicht dadurch die Untersuchung von Oberflächen. Eine schematische Darstellung der Messanordnung ist in Bild 5 dargestellt [5].

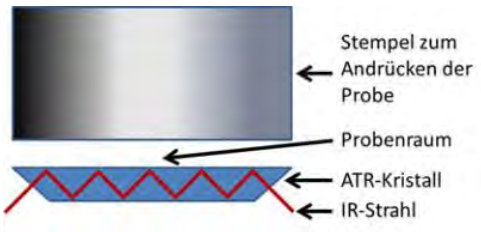


Bild 5 Schematische Darstellung der ATR-Spektroskopie

Durch Vergleiche der Spektren unbehandelter und funktionalisierter Fasern können Rückschlüsse auf Veränderungen, d. h. das Aufziehen der Faserpräparation, gezogen werden.
Für die Messungen werden die Fasern direkt auf den Kristall gelegt, der Stempel geschlossen und die Spektren aufgenommen.

4 Nachweis Präparation

4.1 Nachweis durch Farbstoff

Eine photographische Dokumentation von unbehandelten und behandelten Fasern nach der Farbstoffbehandlung findet sich in Bild 6.
Die unbehandelten Fasern erscheinen nach dem Waschen annähernd farblos, die behandelten unterschiedlich stark und gleichmäßig blaugefärbt.

Bild 6 unbehandelte und funktionalisierte Fasern vor und nach der Farbstoffbehandlung

4.2 Nachweis durch IR-Spektroskopie

Die Spektren der behandelten Fasern weisen im Vergleich zu denen der unbehandelten Fasern zusätzliche Banden auf, die dem Polymer, das zur Faserumhüllung eingesetzt wird, zugewiesen werden können. Exemplarisch sind in Bild 7 Spektren einer Präparationslösung von unbehandelten und präparierten Fasern zusammengefasst.

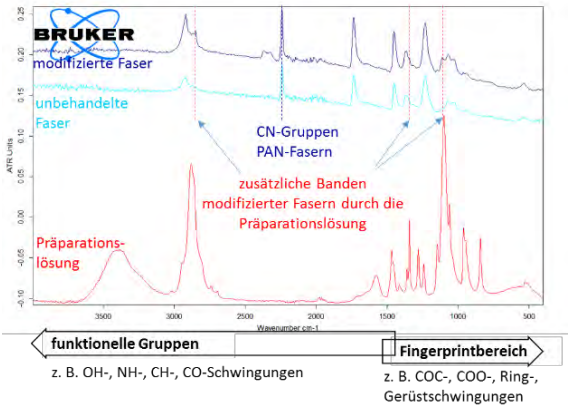


Bild 7 Spektren einer Präparationslösung, sowie von unbehandelten und modifizierten Fasern

5 Baustofftechnologische Untersuchungen

5.1 Experimente

Um eine gute Verarbeitbarkeit des Zementmörtels sowie eine homogene Faserverteilung zu erreichen, wurden systematische Untersuchungen zur Optimierung der Mörtelrezeptur unter Zugabe von handelsüblichen sowie von modifizierten Polyacrylnitril-Fasern (PAN) und Polypropylen-Fasern (PP) durchgeführt.
Zur Bewertung der Verarbeitbarkeit wurde das Ausbreitmaß bestimmt. Die Qualität der Faserverteilung im Mörtel wurde dabei sowohl mit lichtmikroskopischen Untersuchungen als auch mit Hilfe der Röntgen-3D-Computertomographie analysiert.
Um den Einfluss der Faserbehandlung auf die Wechselwirkung der Faseroberfläche mit dem Zementstein zu beurteilen, wurden unter anderem 3-Punkt Biegezugfestigkeiten von Mörtelprismen mit funktionalisierten Fasern und Standardfasern sowie von unbewehrten Prismen bestimmt. Das Verbundverhalten zwischen Faser und Mörtel wurde mit einem speziell für das Projekt konzipierten Einzelfaserdurchzugsversuch (Bild 8) bewertet. Zur Bewertung des Schwindverhaltens wurden Betonplatten mit einem dünnlagigen Putz beschichtet und unmittelbar nach Herstellung in einen Windkanal verbracht (Bild 9). Nach der Erhärtung wurden dann die Oberflächenrisse optisch analysiert (z. B. Häufigkeit und Öffnungsweite).

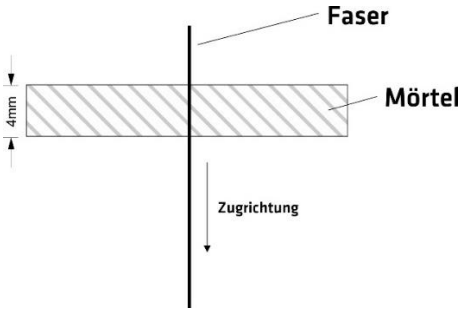


Bild 8 Schematische Darstellung eines 4 mm dicken Probekörpers mit eingebetteter Faser für den Einzelfaserdurchzugsversuch

Bild 9 Klimatisierter Windkanal mit frisch verputzten Betonplatten [in Anlehnung an den Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Polymerfasern zur Verwendung in Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 mit nachgewiesener Wirksamkeit]

5.2 Ergebnisse

Durch Variation des Wasser-Zement-Wertes sowie des Verhältnisses Sand / Kalksteinmehl ist es gelungen, einen Mörtel mit einem Ausbreitmaß zu rezeptieren, welches allgemein eine gute Verarbeitbarkeit wiederspiegelt. Weiterhin war es möglich, auf die Zugabe von Fließmitteln zu verzichten, um im ersten Schritt ungewollte Kreuzreaktionen zu vermeiden. Mit Hilfe der Lichtmikroskopie und der Mikro-Röntgen-3D-Computertomografie (3D-CT) konnte nachgewiesen werden, dass im ausgehärteten Mörtel eine weitgehend homogene Faserverteilung vorliegt und es nur sehr vereinzelt zur Bildung von Agglomeraten kommt (Bild 10, Bild 11).
Die Auswertung der Biegezugversuche zeigt, dass durch die Zugabe von Fasern das Nachrissverhalten entscheidend verbessert wird. Während der optimale Fasergehalt bei den vorliegenden Versuchen für 4 bzw. 6 mm lange PAN-Fasern bei ca. 0,75 Vol.-% liegt, ist bei Verwendung von PP-Fasern vergleichbarer Länge ein Fasergehalt größer 1 Vol.-% anzustreben. Ein Einfluss der Funktionalisierung der Faseroberfläche auf das Nachrissverhalten und die Verbundeigenschaften konnte bislang in den Biegezugversuchen und auch in Einzelfaserdurchzugsversuchen (Bild 12) nicht nachgewiesen werden. Hier sind aktuell weitere Versuche mit Carbonfasern geplant.

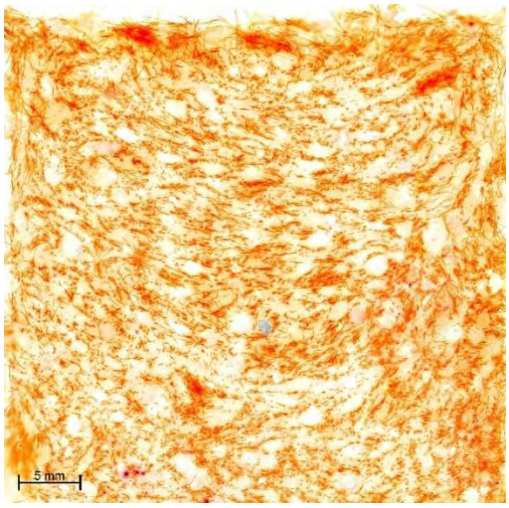


Bild 10 Lichtmikroskopische Aufnahme (invertiert) eines Normprismenquerschnittes unter UV-Licht mit PAN-Fasern (hier orange/rot gefärbt; 4 mm lang; 0,5 Vol.-%)

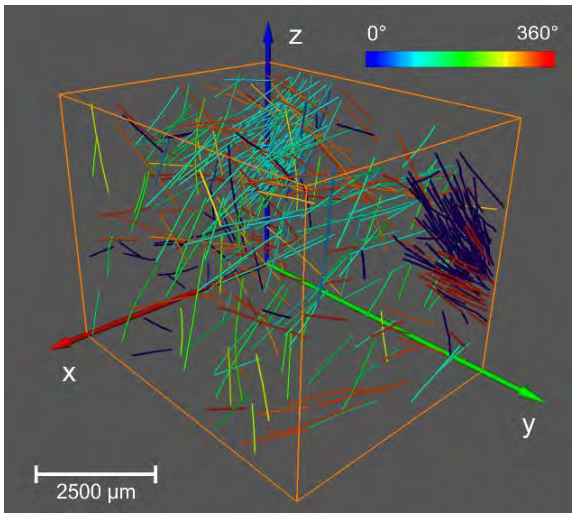


Bild 11 Räumliche Verteilung und Orientierung der PAN-Fasern in einem Mörtelprismaausschnitt (4 mm lang; 0,5 Vol.-%) aufgenommen mit 3D-CT

Bild 12 Typisches Ergebnis des Einzelfaserdurchzugsversuchs einer unbehandelten PAN Faser (d = 80 µm) aus einem Mörtel

6 Zusammenfassung

Durch eine Modifikation von Polymerfaseroberflächen auf molekularer Ebene mithilfe einer Kombination von Polymer (»Netz«) ergänzt mit hydrophilen Gruppen (»Anker«) sowie grenzflächenaktiver Verbindung (»Brücke«) soll eine bessere Einbindung in zementgebundene Werkstoffe erreicht werden.
Eine Variation der einzelnen Komponenten bewirkt eine Oberflächenfunktionalisierung von unterschiedlichen Polymerfasern. Durch die gezielte Auswahl von grenzflächenaktiven Verbindungen kann eine Umhüllung von Polyacrylnitril-, aber auch anderen Fasertypen erreicht werden.
Im Rahmen der ersten Versuche zur Beurteilung des Schwindverhaltens konnte gezeigt werden, dass durch die Zugabe von Fasern dieses verbessert wird (Rissanzahl, Gesamtrisslänge und Rissöffnungsfläche werden reduziert) und sich dieser Effekt durch die Funktionalisierung der Oberfläche noch verstärkt. Dieses Ergebnis ist unter Verwendung weiteren Mörtelrezepturen zu verifizieren.

7 Literaturverzeichnis

[1] Patent DE 43 16 666 C1 (13.5.1993) »Hydrophilierungsmittel«

[2] Patent DE 43 16 667 C1 (13.5.1993) »Hydrophile synthetische Armierungs- und Prozeßfasern mit silikataffinen Eigenschaften«

[3] Patent WO 94/26969 (24.11.1994) »Variable, liquid surface finishing medium«

[4] J. Peschel, H. Seibt, D. Ballschuh, R. Ohme: »Sulfobetaine; Teil 5: Anwendung von Sulfobetainen als neue Zusatzstoffe für Chemiefaserpräparationen«, in: Tenside Surf. Det. 30 (1993) 321

[5] Hesse, M., Meier, H., Zeeh, B.: Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie, 3. überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag Stuttgart (1987)

Das Vorhaben »Funktionalfaser« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF unter den Förderkennzeichen 13N13305 und 13N13306 gefördert.

BAM

IONYS
chemistry in engineering
for durable constructions

HESTER

HighTech MatBau

Hybrides Ertüchtigungssystem für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe

Stephan Villaret, Tanja Tschernack, Villaret Ingenieurgesellschaft mbH

Kurzfassung: Mit ständiger Zunahme des Verkehrsaufkommens wird die Verfügbarkeit von Straßenverkehrsflächen zunehmend wichtiger. Dies betrifft insbesondere die überregionalen Verkehrsverbindungen und die Stadtstraßen. Erhaltungssysteme, die einerseits qualitativ hochwertig und dauerhaft sind und andererseits in kürzester Bauzeit ausgeführt werden können, stehen daher im Fokus. Mit der Erforschung des »Hybriden Ertüchtigungssystems für die Straßenerhaltung unter Einsatz neuartiger Werkstoffe-HESTER« wurde ein Fertigteil-basiertes Oberbau-/Sanierungssystem aufgestellt, das in der Lage ist, die genannten Anforderungen optimal zu erfüllen. Bei der Erforschung wurde großen Wert auf eine systematische Vorgehensweise, beginnend mit der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen bis hin zur Herstellung eines Praxisdemonstrators, gelegt.

Stichworte: Hybrides Ertüchtigungssystem, Fertigteilbauweise, dauerhafte Straßeninfrastruktur, Verfügbarkeit

1 Allgemeines

Neue Werkstoffe für den Einsatz in urbanen Infrastrukturen tragen dazu bei, Baumaßnahmen mit dem Ziel einer langlebigen und beständigen Konstruktion energie- und ressourceneffizient durchzuführen und somit eine nachhaltige Mobilität zu unterstützen. Eine erfolgreiche Wirtschaft benötigt eine leistungsfähige, dauerhafte und verfügbare Straßeninfrastruktur. Entscheidend sind dabei unter anderem die Lebenszykluskosten, die sich innerhalb der Nutzungsdauer einer Verkehrsfläche akkumulieren.

Straßenbefestigungen sind sowohl verkehrsbedingten als auch klimatischen äußeren Einwirkungen ausgesetzt. Da diese beiden Größen in der letzten Zeit zunehmend Veränderungen unterliegen, kann hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Straßenbefestigungen nur bedingt auf Erfahrungswerte aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden. So hat sich die Verkehrsbelastung während der letzten 30 Jahre verfünffacht, für die nächsten 30 Jahre wird weiterhin eine Verdopplung des Schwerverkehrsaufkommens prognostiziert. Ebenso sind bereits heute die Auswirkungen der Klimaänderung deutlich erkennbar. Einerseits wird eine weitere Zunahme der mittleren Temperaturen (generelle Erwärmung), andererseits eine weitere Spreizung der Extremwerte sowie deren Häufung prognostiziert.

Auf der Widerstandsseite der Straßeninfrastruktur stehen diesen Einflüssen im Wesentlichen die Dicke des gesamten Oberbaus sowie dessen Materialeigenschaften, insbesondere die Materialfestigkeit und -steifigkeit, entgegen.

Für die Verfügbarkeit der Straßen werden Ertüchtigungssysteme benötigt, die nach kurzer Sperrzeit wieder nutzbar sein müssen. Priorität sollte dabei die Dauerhaftigkeit der durchgeführten Erhaltungsmaßnahme haben, so dass möglichst große Zeiträume zwischen den Erhaltungsmaßnahmen mit dem Ziel einer hohen Verfügbarkeit erreicht werden können. Für eine gezielte und optimale Nutzung der zukünftig vorhandenen Ressourcen sind deshalb modulare und somit schnell ausführbare Systeme mit der Zielstellung kürzester Bauzeiten zu erproben. Unter Beachtung der vorhandenen Infrastruktur kann die Erarbeitung hybrider Konstruktionen dazu beitragen, Erhaltungs- und Unterhaltungskosten zu senken, was zur Reduktion der Lebenszykluskosten führt.

Mit der Verwendung von Fertigteilen können Betone hoher Qualität zielsicher hergestellt werden. Bauzeiten in situ und damit Verkehrsbehinderungen werden gegenüber monolithisch hergestellten Betonbefestigungen drastisch reduziert.

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens besteht deshalb darin, die Betonfertigteilbauweise für Straßenbefestigungen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Befestigungen, Reduzierung der Bauzeiten in situ, Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Ressourcenschonung zu optimieren. Diese Zielstellung gilt dabei insbesondere für Maßnahmen im Rahmen der Erhaltung der Befestigungen.

2 Grundlagen

Das Forschungsvorhaben HESTER wird als Verbundvorhaben von den Verbundpartnern Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Otto Alte-Teigeler GmbH (OAT), Heinz Schnorpfeil Bau GmbH, BTE Stelcon GmbH, Technische Universität Dresden (TUD) sowie der Villaret Ingenieurgesellschaft als Verbundkoordinator durchgeführt.
Die Arbeiten wurden zuvor in verschiedene Arbeitspakete unterteilt, die unter anderem Themen zu konstruktiven sowie baustofflichen Aspekten, zur Bestandsaufnahme mit halbautomatischer Softwaresystemlösung und schließlich einen Demonstrator beinhalten.
Bislang wurden Fertigteile für Verkehrsanlagen grundsätzlich in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Das bedeutet, dass im Falle erhöhter Zugspannungen in der oberen oder unteren Randfaser des Fertigteils die Zugfestigkeit des Betons überschritten werden kann. Nach entsprechender Rissbildung übernimmt der Bewehrungsstahl die auftretenden Zugkräfte.
Ziel des Forschungsvorhabens ist es, unbewehrte Fertigteile zum Einsatz zu bringen. Aufgrund der fehlenden Bewehrung ist es notwendig, die Zugfestigkeit des Betons so weit zu erhöhen, dass ein Überschreiten dieser sowohl beim Einbau als auch im Gebrauchszustand nicht erfolgt.
Zu beachten sind dabei Beanspruchungen aus Transport und Einbau der Fertigteile sowie aus Verkehr und Witterung im eingebauten Zustand. Ist eine Kopplung zur vorhandenen Fahrbahnkonstruktion gegeben, sind auch die daraus resultierenden Beanspruchungen zu berücksichtigen.

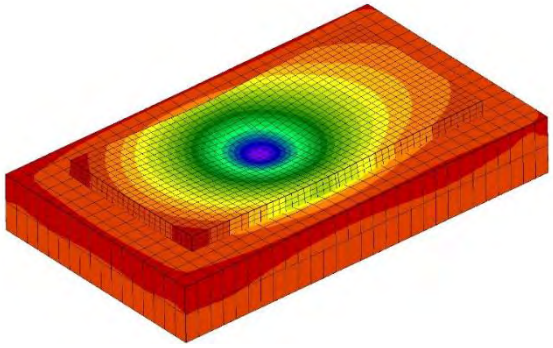


Bild 1 Untersuchungen mit 3D-FEM am 2-Platten-System

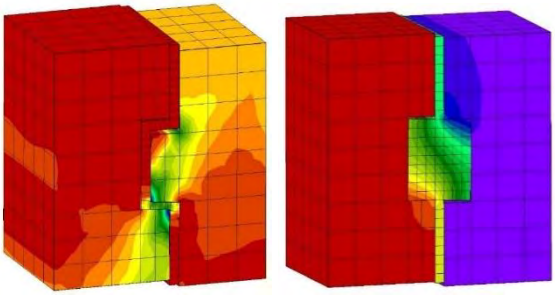


Bild 2 3D-FEM-Details zu möglichen Kopplungssystemen zwischen einzelnen Fertigteilen

Die Erarbeitung theoretischer Grundlagen für Dimensionierung und Konstruktion gingen den Werk- und Baustoffuntersuchungen voraus, um systematisch die Anforderungen an die innovativen Stoffe beschreiben und im System umsetzen zu können.
Um eine qualitativ hochwertige Ausführung zu gewährleisten, wird zudem ein halbautomatisches Planungs- und Dimensionierungssystem erarbeitet. Dabei kommen moderne Finite Elemente Modelle mit 3D-Volumenelementen zum Einsatz, mit denen Spannungs- und Verformungszustände einzeln und im Gesamtsystem studiert werden können. Es wird zudem untersucht, ob Messungen mit Laserscannern (Punktwolken) als Basis für die Planung und die Berechnungen dienen können.

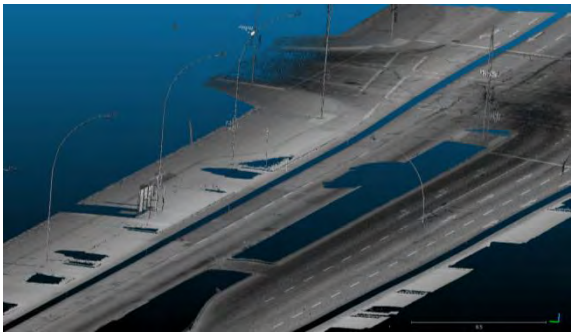


Bild 3 Laserscan der Bushaltestelle im Bestand

3 Laborversuche

Zur Erforschung des Materials für die Fertigteile wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Auf der Grundlage erster Tastversuche konnten zunächst drei verschiedene Betongrundrezepturen definiert und jeweils für den Einsatz mit Glas- und Kunststofffasern modifiziert werden. Aus den insgesamt 9 Betonrezepturen wurden Probekörper hergestellt, anhand welcher die Spaltzug- und Druckfestigkeiten sowie die Nacherhärtung ermittelt werden konnten. Basierend auf diesen Ergebnissen sowie weiterführenden Betrachtungen (Ermittlung von Ermüdungsfunktionen) stellte sich eine Vorzugs-Betonrezeptur heraus, die für die im Projekt herzustellenden Platten Verwendung finden sollte.

4 Großversuch Prüfhalle

Parallel zu den Betonversuchen erfolgten Untersuchungen insbesondere im Hinblick auf die Fertigteilkopplung sowie auf die höhen- und lagegerechte Ausrichtung der Fertigteilplatten.

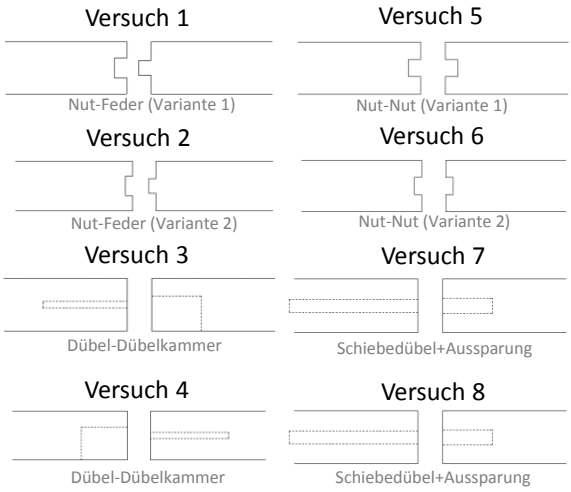


Bild 4 Getestete Kopplungssysteme

Für die Fertigteilkopplung erarbeitete der Verbund verschiedene Systeme. Um die jeweilige Anwendbarkeit zu prüfen, wurden in einem Versuch im Labor der TU Dresden in 2 Durchgängen jeweils zwei Fertigteilplatten (je Plattenpaar waren 4 Kopplungssysteme möglich) eingebaut und mit einer zyklischen Dauerbelastung mit 1 Mio. LW und 80 kN belastet.

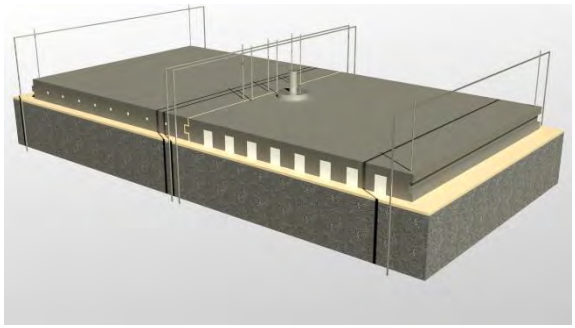


Bild 5 Prinzipieller Versuchsaufbau

Jeweils vor und nach der Belastung sowie nach dem Durchtrennen im Bereich der Kopplung wurde eine statische Rampe bis 80 kN aufgebracht. Über zuvor an den Fertigteilen angebrachte Dehnmessstreifen und induktive Wegaufnehmer konnten dabei Dehnungen und Verschiebungen gemessen werden. Mit diesem Vorgehen war es möglich, insgesamt acht Kopplungssysteme zu testen.

Bild 6 Prüfstand TU Dresden

In zuvor durchgeführten Projekten erfolgte die Ausrichtung der Platten stets durch Traversen, die auf der angrenzenden Fahrbahnkonstruktion aufgelegt wurden. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde daher von dem Verbundpartner STELCON das Höhenjustiersystem »HESTER-Kombi« erarbeitet, das es ermöglicht, die Platten unabhängig von der Bestandsfahrbahn auszurichten. Zudem dienen die Elemente gleichermaßen dem Transport der Fertigteile zur Baustelle. Weitere Untersuchungen werden durchgeführt, um auch das Unterfüllen der Fertigteile über dieses System zu ermöglichen.

5 Fertigteile duraBASt

Auf den theoretischen Untersuchungen und den Versuchen im Labor basierend erfolgte im Juli 2017 schließlich ein Großversuch auf dem Gelände des duraBASt, dem Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BASt. Auf einer Fläche mit einer Länge von ca. 20 m und einer Breite von

3,90 m sollten die Fertigteilplatten verlegt werden. Dabei war es unter anderem auch möglich, neben den einzelnen verschiedenen Kopplungssystemen erstmalig auch das neu entwickelte Höhenjustiersystem »HESTER-Kombi« zu testen.

Bild 7 Verlegung eines Fertigteils mit Nut-Feder-System

Im Versuch wurden acht Fertigteilplatten mit den Abmessungen je Fertigteil von 2,47 m × 3,90 m × 0,24 m und einem Gewicht je Fertigteil von 5,8 t eingebaut. Für den Einbau und das Unterfüllen der Fertigteile waren zunächst zwei Tage veranschlagt. Da das Einheben und Ausrichten der Fertigteile jedoch bereits innerhalb kürzester Zeit erfolgen konnte, war es möglich, auch die restlichen Arbeiten bereits am ersten Tag abzuschließen.

Bild 8 Fertigteil mit eingesetzten Dübeln (Dübel-Dübelkammer-System)

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass alle Kopplungsvarianten auf der Baustelle praktikabel sind und das Höhenjustiersystem für die vorgesehene Aufgabe geeignet ist.

6 Demonstrator Bushaltestelle

Mit den Erfahrungen aus den Laborversuchen und dem Großversuch auf dem duraBASt sollte nunmehr ein Demonstrator in situ unter realen Bedingungen erstellt werden. Bereits im Bearbeitungsprozess des Forschungsvorhabens entschied sich der Forschungsverbund dafür, den Demonstrator im Bereich einer innerstädtischen Bushaltestelle anzulegen. Mit der Unterstützung des Berliner Straßen- und Grünflächenamtes Marzahn-Hellersdorf konnte dafür eine geeignete Fläche gefunden werden. Der Fahrbahnbereich der Haltestelle, eine ältere ca. 30 m lange und 3,0 m breite Betondecke, wies bereits vermehrt Risse auf, so dass zumindest eine zeitnahe Sanierung ohnehin erforderlich gewesen wäre.

Bild 9 Verlegung des ersten Fertigteils am Schacht

Bild 10 Verlegung der zweiten Fertigteilplatte am Schacht mit Hilfe des klassischen Verlegesystems (Stahlseile und Schwerlastanker)

Eine Besonderheit war zudem ein in der Fläche liegender Schacht, der bei der Planung der Fertigteile berücksichtigt werden musste. Vor dem Einbau der Fertigteile wurden bereits die Nebenanlagen erneuert. So wird durch den Einbau eines Kasseler Bordes fortan das barrierefreie Ein- und Aussteigen an dieser Haltestelle ermöglicht.

Bild 11 Exakter Einbau des Fertigteils am Kasseler Bord mit Seitenablauf

Die Planungen zum Bau der Nebenanlagen sowie zu den Fertigteilen erfolgten innerhalb des Forschungsvorhabens und wurden aufeinander abgestimmt. Der Einbau der Fertigteile des Demonstrators erfolgte schließlich im August 2017 unter großem medialem Interesse. Innerhalb eines Tages wurden insgesamt 13 Fertigteile mit den Abmessungen von 2,40 m × 3,00 m × 0,24 m eingebaut, lage- und höhenmäßig ausgerichtet, mit Silikatharz unterfüllt und der Fugenverschluss hergestellt.

Bild 12 Ausrichtung und Höhenjustierung der Fertigteile

Hinsichtlich der Verlegetechnik wurde neben dem klassischen System mit Stahlseilen und Schwerlastankern bei zwei Fertigteilen auch ein alternatives System mit Hochleistungsgurtbändern getestet. Hierzu wurde im Vorfeld eine entsprechende Aussparung an der Unterseite der Fertigteilelemente werkseitig berücksichtigt.

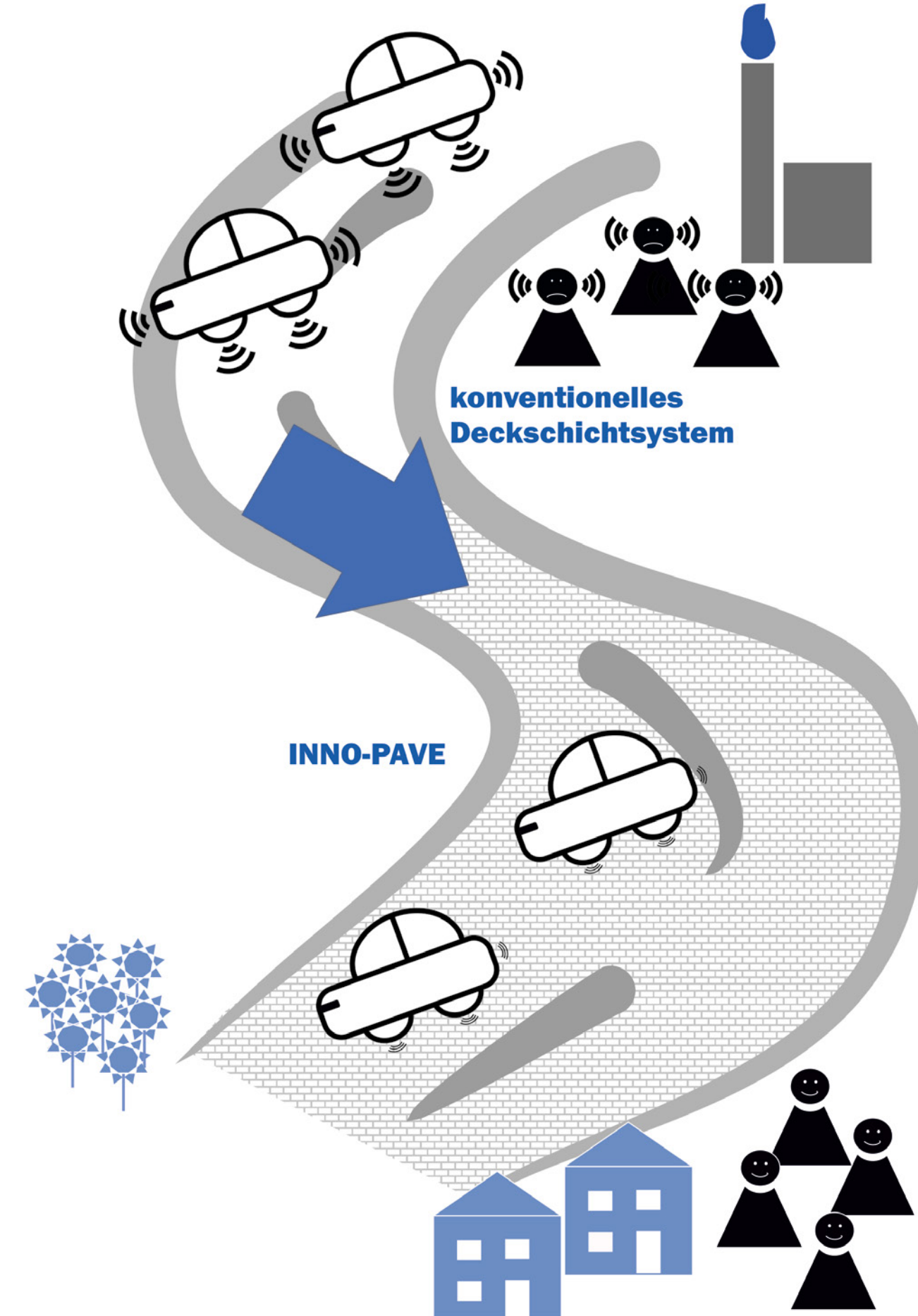
Bild 13 Alternative Verlegetechnik mittels Hochleistungsgurtbändern

Bild 14 Unterfüllen der Fertigteile nach der Verlegung

Es zeigte sich, dass auch unter realen Bedingungen der Einbau der Fertigteile innerhalb eines Tages erfolgen kann. Eine Verkehrsfreigabe wäre kurze Zeit später bereits möglich gewesen. Im vorliegenden Fall wurde jedoch im Anschluss an den Fertigteileinbau noch der angrenzende Asphaltbereich abgefräst und erneuert, so dass eine Freigabe erst nach Abschluss dieser Arbeiten erfolgen konnte.

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13XP5000A bis 13XP5000C und 13XP5000E bis 13XP5000G gefördert.

INNO-PAVE



Grundlegende Erforschung polymerer Werkstoffe sowie innovativer Herstellungs- und Einbautechnologien für Straßendeckschichtsysteme

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser, Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen, Sabine Faßbender, M.Sc., Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen, Daniel Hilpert, HUESKER Synthetic GmbH

Kurzfassung: Das Ziel des Projektes »Innovative Pavement« (nachfolgend als INNO-PAVE bezeichnet) ist die grundlegende Erforschung neuer Werkstoffe für aufrollbare Straßendeckschichten. Des Weiteren steht die Entwicklung von Einbau- und Fertigungsverfahren im Fokus des Projektes, um eine qualitätsgesicherte und kontinuierliche Fabrikfertigung zu ermöglichen. Dies erfolgt durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von öffentlichen und industriellen Forschungseinrichtungen und Unternehmen.
Grundlegender Forschungsansatz ist es, dies durch die Verwendung polymerbasierter Werkstoffe in Verbindung mit textilen Bewehrungsstrukturen zu realisieren. Die Dauerhaftigkeit und Gebrauchseigenschaften, die Griffigkeit und insbesondere die akustischen Eigenschaften gebräuchlicher lärmreduzierender Straßendeckschichten, wie beispielsweise des Offenporigen Asphaltes, sind signifikant zu übertreffen. Angestrebt wird eine dauerhafte lärmreduzierende Wirkung von mindestens 10 dB(A) mit einer akustischen und bautechnischen Lebensdauer von mindestens 25 Jahren. Dies entspricht einer gefühlten Halbierung des Verkehrsaufkommens und im Vergleich zu heute üblichen lärmreduzierenden Bauweisen einer vierfach längeren akustischen Lebensdauer. Weiterhin wird ein dauerhaftes Griffigkeitsniveau von mindestens 60 SRT-Einheiten angestrebt. Eine ausreichende Kraftübertragung zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn – Antriebs- und Bremskräfte sowie Seitenkräfte aus Kurvenfahrt – sowie kurze Bremswege sind bei jeder Witterung zu gewährleistet.

Stichworte: Straßendeckschichtsystem, polymerbasierte Werkstoffe, Materialsynthese, Dauerhaftigkeit, werkstofflich-optimierte Straße, standardisierte, multifunktionale Straßenoberfläche, ausrollbare Straße, lärmreduzierende Straßenoberfläche, textilbewehrte Straße

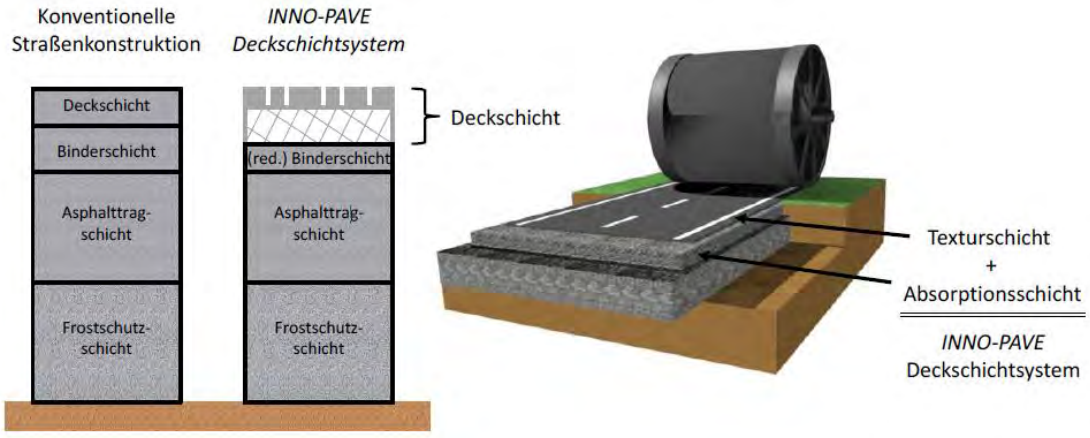


Bild 1 Konzept INNO-PAVE

1 Gesamtziel des Vorhabens

In Deutschland und in vielen entwickelten Ländern der Welt ist mit einem steigenden Aufkommen des Individualverkehrs und einem Zuwachs der Güterverkehrsströme zu rechnen. Für den Zeitraum von 2004 bis 2025 wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in Deutschland eine Steigerung des Straßengüterverkehrsaufkommens von über 50 % prognostiziert [1]. Dies führt in Kombination mit der derzeitigen Altersstruktur unserer Straßen zu einem steigenden Neubau- und Sanierungsbedarf [2]. Die heutige in-situ-Fertigung von Asphaltstraßen unterliegt beträchtlichen Umgebungseinflüssen, die zu großen Qualitätsschwankungen führen können. Diese beeinflussen maßgeblich die Lebensdauer sowie die Gebrauchseigenschaften der Straße. Auch führen die derzeitigen Herstellungs- und Einbauverfahren zu einem langsamen Baufortschritt. Neubau- oder Sanierungsmaßnahmen sind daher eine wesentliche Ursache für Staus [4]. Gleichermaßen steigen mit zunehmendem Verkehrsaufkommen auch die Belastungen der Bevölkerung durch Lärm und Schadstoffe [5].

Das Ziel des Forschungsprojektes INNO-PAVE ist die Realisierung einer unter konstanten Bedingungen herstellbaren und mehrschichtigen Straßendeckschicht unter Verwendung polymerbasierter und textiler Werkstoffe. Der Demonstrator von INNO-PAVE wird auf dem Testgelände duraBASt der Bundesanstalt für Straßenwesen realisiert. Hieran erfolgt eine Analyse des Wirkpotenzials des Deckschichtsystems.

Dieses vollkommen neuartige Straßenbaukonzept sieht eine hochpräzise industrielle Fertigung des Straßenbelages in engsten Toleranzbereichen vor. Hierdurch kann ein qualitätsgesicherter Bau der Deckschicht unter Reduzierung von schädlichen äußeren Einflüssen realisiert werden. Die Qualität steigt! Eine Instandsetzung vorhandener Straßen ist in vergleichsweise kurzer Zeit möglich. Die Eingriffe in den Verkehr und die damit verbundenen Umwelt- und Verkehrsbeeinträchtigungen sowie die daraus resultierenden betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten werden vermindert.

1.1 Industrielle und gesellschaftliche Relevanz des Themas

Die Anforderungen an eine nachhaltige Mobilität sowie eine umwelt- und klimafreundliche, sozial verantwortliche und gleichsam wirtschaftlich effizient gestaltete Infrastrukturentwicklung bedürfen eines grundlegenden Umdenkens im Straßenbau. Die aktuellen Zuwächse des Individualverkehrs sowie die prognostizierte Zunahme der Güterverkehrsströme erfordern eine grundlegende Anpassung der Herangehensweise. Zukünftige »Hochleistungsbeläge« können nicht mit konventionellen Herstellungs- und Einbautechnologien sowie »natürlichen« Werkstoffen (Bitumen und Gestein) realisiert werden. Vielmehr sind solche Beläge nur durch neue Werkstoffe sowie qualitätsgesicherte und standardisierte Fertigungs- und Einbauverfahren herstellbar. Erst dies ermöglicht die Funktionserweiterung des Bauwerks Straße, die für eine Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit der Straßeninfrastruktur unerlässlich ist. Auch können hierdurch der Verknappung von Ressourcen sowie den zunehmenden Belastungen von Bevölkerung und Umwelt infolge verkehrsinduziertem Lärm und Schadstoffen entgegen gewirkt werden. Zukünftige multifunktionale Straßen werden auch von Forschungen im Bereich der Informationstechnologie partizipieren. Hier ist die zunehmende Nutzung von Daten für die individuelle bzw. kollektive Verkehrsbeeinflussung und Unterstützung der Fahrer bis hin zur weiteren Automatisierung der Fahraufgabe bereits heute denkbar.

Das Konzept INNO-PAVE steht dabei nicht in Konkurrenz zu bereits vorhandenen Bauweisen, vielmehr ist es als zielgerichtete Ergänzung zur Standardbauweise zu verstehen. Insbesondere im urbanen Umfeld können die hohen Anforderungen an die mechanischen sowie akustischen Eigenschaften nicht mit den herkömmlichen Bauweisen erfüllt werden, sodass innovative Ansätze wie INNO-PAVE benötigt werden, um die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur unter Vermeidung hoher sozioökonomischer Kosten aufrecht erhalten zu können.

1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Das wissenschaftliche und technische Ziel des Verbundes ist die Erforschung neuer polymerer Werkstoffe sowie Herstellungs- und Einbautechnologien und -verfahren für einen Hochleistungs-Straßenbelag, der die Dauerhaftigkeit und die akustischen Eigenschaften heute üblicher »leiser« Straßendeckschichten weit übertrifft.

Es wird eine dauerhafte Reduzierung des durch Reifen-Fahrbahngeräusche induzierten Lärmpegels mit einer akustischen und bautechnischen Lebensdauer von mindestens 25 Jahren angestrebt. Dies soll durch einen mehrschichtigen Aufbau von INNO-

PAVE (vgl. Bild 2) realisiert werden. Eine obere Texturschicht reduziert die Schallentstehung infolge der Anregung des Reifens zu mechanischen Schwingungen sowie aerodynamischer Anregungseffekte im Kontaktbereich Reifen-Fahrbahn.
Eine darunter angeordnete, mehrlagige und textilbewehrte offene Absorptionsschicht absorbiert zusätzlich Lärm. Die Zusammenstellung der Absorptionsschicht ist unter Berücksichtigung der Akustik und der Verlegbarkeit zu erforschen. Dies lässt ein maximales Lärmminderungspotenzial erwarten. Bereits vorliegende Erkenntnisse des Institutes für Straßenwesen aus Vorgängerprojekten dienen hier als Ausgangspunkt der Untersuchungen.

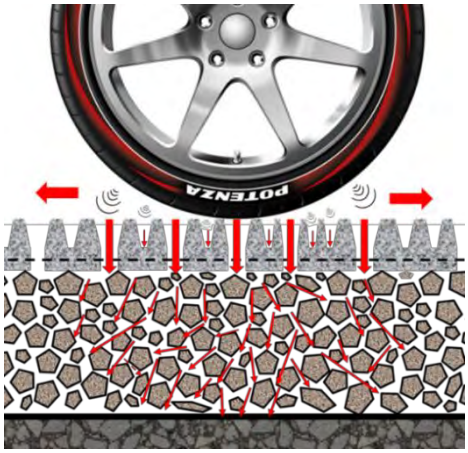


Bild 2 Konstruktiver Aufbau von INNO-PAVE

Die mehrschichtige Konstruktion kann individuell an die Erfordernisse des Einsatzortes bzw. die Bedürfnisse der Bevölkerung angepasst werden. Helligkeit, Farbe und Struktur der Fahrbahn können gezielt modifiziert werden.
Durch den Einsatz einer textilen Bewehrung werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen ermöglicht die Bewehrung die Handhabung der zuvor hergestellten Schichten der Fahrbahn durch ihre Funktion als flexible Trägerstruktur. Zum anderen wird durch die Bewehrung die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn gesteigert, indem Zugkräfte aufgenommen und das Entstehen von Rissen und Verformungen verhindert wird.
Bei der Erforschung der textilen Bewehrung bestehen folgende Arbeitsziele. Es werden für die einzelnen Bewehrungslagen Fasermaterialien ausgewählt die sowohl den Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit entsprechen, als auch genügend Flexibilität aufweisen. Anhand eines Belastungsmodells erfolgt die Auslegung der textilen Struktur. Um eine hinreichende Medienbeständigkeit zu gewährleisten und eine Anbindung der Bewehrung an das Matrixmaterial zu ermöglichen, erfolgt die Auswahl einer geeigneten Beschichtung der Bewehrungsstruktur.
Die Gebrauchseigenschaften der obersten Deckschicht sollen mindestens dem Stand heutiger bautechnischer Ansätze entsprechen. Eine ausreichende Drainage und Griffigkeit bei Nässe ist gemäß dem Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff-StB 2012) [3] unabhängig von der Geschwindigkeit nachzuweisen. Die Erforschung des Werkstoffes der oberen Texturschicht ist auch vor diesem Hintergrund voranzutreiben. Eine ausreichende Kraftübertragung zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn – Antriebs- und Bremskräfte sowie Seitenkräfte aus Kurvenfahrt – sowie kurze Bremswege sind bei jeder Witterung zu gewährleisten.

2 Problembeschreibung

Die Leistungsfähigkeit der deutschen Straßeninfrastruktur ist von enormer gesellschaftlicher Bedeutung. Sie bildet nicht nur die Grundlage für Beschäftigung und Wohlstand, sondern stellt auch ein zentrales Element der Vermögenswerte des Staates dar. Die prognostizierte Zunahme des Güterverkehrsaufkommens [1], die Altersstruktur unserer Straßen sowie die steigenden Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gefährden dieses Gut. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, ist die Etablierung innovativer bautechnischer Konzepte. Allerdings haben umfangreiche Standardisierungen der Bauaufgabe sowie die starke Fokussierung auf Kostenaspekte, vor allem im Bereich des öffentlichen Infrastrukturbaus, in der Vergangenheit dazu geführt, dass Innovationspotenziale nicht voll ausgeschöpft wurden. Der hierdurch entstandene Technologierückstand gegenüber anderen Wirtschaftszweigen, wie beispielsweise der Automobilindustrie, ist auch deshalb beachtlich.

3 Lösungsansatz

INNO-PAVE verbindet interdisziplinär verschiedene Bereiche des Ingenieurwesens, wie die Straßenbautechnik, die Mechanik, die Materialwissenschaft und die Chemie sowie die Herstellungs- und Anwendungstechnik.
Hierdurch wird eine problemadäquate Herangehensweise sichergestellt. Das Konzept INNO-PAVE beruht dabei auf völlig neuartigen Herstellungs- und Einbauverfahren sowie dem Einsatz multifunktionaler Werkstoffe und innovativer Bauweisen. Statt wie bisher mit herkömmlichen natürlichen Materialien eine große Dauerhaftigkeit sowie optimale Ge-

brauchseigenschaften der Straße anzustreben, erfolgt dies bei INNO-PAVE losgelöst von konventionellen Materialien. Diese für den Straßenbau neuen Materialien sowie die Herstellung des Deckschichtsystems und die damit verbundenen optimalen Gebrauchseigenschaften machen die Attraktivität des vorgestellten Lösungsansatzes gegenüber bisherigen bautechnischen Ansätzen aus.

4 Stand der Ergebnisse

Ende November fand das Meilensteintreffen des Konsortiums statt, in dem der aktuelle Ergebnisstand aller Verbundpartner präsentiert wurde. Die Ergebnisse werden in dem folgenden Abschnitt dargestellt.

4.1 INNO-PAVE Texturschicht

Die Struktur der Texturschicht wurde bereits in einem Vorgängerprojekt (LIDAK) untersucht und hinsichtlich der akustischen Eigenschaften optimiert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen mussten in INNO-PAVE die mechanischen Eigenschaften der Polymermatrix und der Textilstruktur weiterentwickelt werden. Hierzu wurden FEM-Berechnungen erstellt, in denen die auftretenden Lastfälle simuliert wurden. Aus den Berechnungen konnten die Anforderungen an die Polymermatrix abgeleitet werden. Jedoch zeigte sich bei den FEM-Berechnungen, dass die Fahrbahnsäulen am stärksten belastet werden. Die Ergebnisse der Simulationen wurden durch die praktischen Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt LIDAK bestätigt.
Aus den ermittelten Anforderungen wurden verschiedene Rezepturen entwickelt. Trotz der sehr guten technischen Eigenschaften der Polymermatrix bei hohen und niedrigen Temperaturen wurden kritische Spannungsspitzen in den Fahrbahnsäulen festgestellt. Aus diesem Grund musste die Geometrie der Fahrbahnsäulen angepasst werden. Durch ein Abrunden und eine Reduzierung der Höhe der Fahrbahnsäulen konnten die Spannungsspitzen reduziert werden, was zu einer leichten Minimierung der akustischen Eigenschaften führte. Diesbezüglich wurde ein Kompromiss zwischen Lärmreduzierung und Stabilität eingegangen, der die Realisierung des Projektes ermöglicht. Die finale Struktur ist in Bild 3 dargestellt.

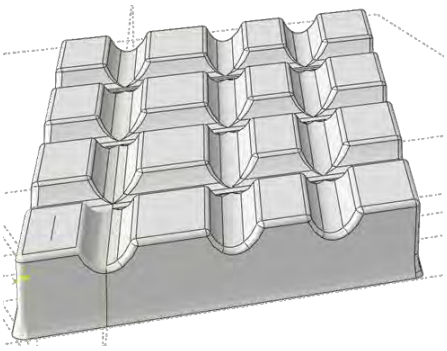


Bild 3 3D-Darstellung Texturschicht (Neumann, Institut für Angewandte Mechanik der RWTH Aachen)

Parallel zur Entwicklung der Polymermatrix und der Struktur der INNO-PAVE Deckschicht wurde die Textilstruktur entwickelt. Das Bewehrungstextil soll zum einen auftretende Zugspannungen aufnehmen sowie das Verbindungsglied zwischen den einzelnen Deckschichtsegmenten sein. Die Basis für die Auslegung der Festigkeit des Bewehrungstextiles war die maximal auftretender Lastfall einer Vollbremsung eines zu 10% überladenen LKWs. Zusätzlich wurde in der Bemessung der Festigkeit eine komplette Kraftaufnahme des Bewehrungstextiles angenommen, was nur bei einer kompletten Delamination zur Unterlage auftreten würde.
In dem Vorgängerprojekt LIDAK wurde auch bereits eine Textilbewehrung eingesetzt. Als Bewehrungstextil im Vorgängerprojekt LIDAK wurde ein Glasfasergitter, welches mit einem Epoxidharz getränkt war, verwendet. In INNO-PAVE wurde Abstand von einer Glasfaserbewehrung (bzw. spröde Rohstoffe) genommen. Die Begründung hierfür liegt in den auftretenden Querkräften zwischen den einzelnen Segmenten der Deckschicht aufgrund vielfacher zu erwartender Lastwechsel. Aus dem genannten Grund wurde eine Polymerbewehrung gewählt, welche eine gute Dehnsteifigkeit aufweist und eine hohe Beständigkeit gegen chemische Einflüsse hat. Neben der Auswahl des Rohstoffes der Bewehrung wurde eine Beschichtung der Faser entwickelt, welche eine angemessene Anhaftung an die Polymermatrix aufweist, damit die Kraftübertragung gewährleistet werden kann. Die derzeitige Herausforderung liegt darin, die unterschiedlichen Beschichtungssysteme auf deren Anhaftungsvermögen zu prüfen.

4.2 INNO-PAVE Absorptionsschicht

Grundlage für die Inno-Pave Absorptionsschicht ist die im Vorgängerprojekt LIDAK entwickelte gum-

mimodifizierte polyurethan-gebundene Zwischenschicht. Diese basiert auf dem Konzept einer poroelastischen Fahrbahnschicht – kurz PERS genannt -, die bereits in einigen Forschungsprojekten (hier genaue Projekte) zur Lärmreduzierung entwickelt worden war. Innerhalb des Projektes LIDAK wurde der Schwerpunkt der Forschung hauptsächlich auf die Lärmvermeidung und -reduzierung gelegt, sodass die Betrachtung der Steifigkeit und der Dauerhaftigkeit des Systems zunächst nicht erfolgte.
Das aktuelle Projekt INNO-PAVE dient schließlich dazu, das zweischichtige Deckschichtsystem LIDAK bezogen auf die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit und damit für die Realisierung weiterzuentwickeln.
Das zunächst mit einem sehr hohen Gummianteil versehene Mischgut der Absorptionsschicht konnte den festgelegten Belastungen bezogen auf die Steifigkeit nicht standhalten. Dies zeichnete sich durch ein hohes Verformungspotential aus, das während der experimentellen Versuche erfasst und durch die rechnerische Ermittlung eines sehr geringen Elastizitätsmoduls bestätigt wurde.
Demnach wurde der Gummigehalt des Mischguts sukzessiv reduziert, um eine geeignete Steifigkeit zu erhalten und gleichzeitig das akustische Wirkpotenzial des Systems zu bewahren.
Unter Anpassung der Korngrößen des Gummis sowie der Gesteine, unter Variation verschiedener Bindemitteltypen und -gehalte sowie verschiedener Hohlraumgehalte, konnte schließlich eine geeignete Mischgutrezeptur entwickelt werden.

4.3 Herstellungs- und Einbautechnologie

Der Einbau des zweischichtigen Deckschichtsystems wird anhand maschineller Unterstützung umgesetzt. Wie im Asphaltstraßenbau wird ein sogenannter PU-Fertiger die Absorptionsschicht in die Straße einbringen und positionieren. Die Entwicklung der genauen Einbautechnologie ist derzeit in Bearbeitung und daher noch nicht zur Veröffentlichung vorgesehen.
Die Texturschicht hingegen soll im Vorlauf in einer Produktionshalle des Projektpartners gefertigt werden und erst vor Ort mit der Absorptionsschicht verbunden werden. Dies ermöglicht einen fehlerfreien Fertigungsprozess der Struktur, die eine Verbesserung der Beständigkeit anstrebt.

5 Zusammenfassung

Das Projekt INNO-PAVE dient der Erforschung eines lärmreduzierenden Fahrbahnaufbaus, der auf Basis künstlicher Materialien und innovativer Technologien umgesetzt wird.
Die Umsetzung wird durch die Projektpartner, die sowohl aus der Forschung als auch aus der Industrie stammen, umgesetzt und zeigt sehr innovative Ansätze und Realisierungsmöglichkeiten auf.
Bisher konnte ein funktionierendes Fahrbahnsystem entwickelt werden, das bis zum Ende der Projektlaufzeit im Realmaßstab als großflächiger Demonstrator umgesetzt werden soll.
Die Projektpartner danken dem Ministerium für Bildung und Forschung für die Gelegenheit, das Projekt unter den Förderkennzeichen 13XP5001A bis 13XP5001F bearbeiten zu können.

6 Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: »Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025«, FE-96.0857/2005, 2007

[2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: »Straße im 21. Jahrhundert – Innovativer Straßenbau in Deutschland«, 2012

[3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: »Merkblatt für die Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe«, Ausgabe 2012, Köln, 2012

[4] Kemper, D.: »Vergleichende Betrachtung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen bei Tag und Nacht« Dissertation am Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Nr. 52, 2010

[5] Stöckert, U.: »Aktuelle Forschung zu geräuscharmen Straßenbelägen«; Vortrag im Rahmen des Workshops lärmarme Straßenbeläge innerorts; 03/2010; Bergisch-Gladbach

MultiLC

HighTech MatBau

Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften

Claudia Lösch[1], Dietmar Stephan[2], Mike Schlaich[1], Frank U. Vogdt[3], TU Berlin, [1]Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau; [2]Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie; [3]Fachgebiet Bauphysik und Baukonstruktionen - Institut für Bauingenieurwesen

Kurzfassung: Die Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit beim Bau und Betrieb von Gebäuden gewinnt immer mehr an Bedeutung. Das dreijährige Forschungsvorhaben MultiLC, gefördert vom BMBF, hat zum Ziel, durch die Formulierung multifunktionaler Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften einen Ansatz für die Gebäudehülle zur Effizienzsteigerung zu bieten. Ausgehend von Infraleichtbeton, einem gleichzeitig lastabtragenden und wärmedämmenden Hochleistungsleichtbeton, werden multifunktionale Bauteile mit inhomogenen Eigenschaften konzipiert und in Demonstratoren umgesetzt. Wände mit über den Querschnitt verteilten Festigkeits- und Wärmedämmeigenschaften kombiniert mit Funktionen wie Wärmespeicherung, Wandaktivierung zur aktiven Dämmung und Photokatalyse zur Schadstoffumwandlung werden erforscht. Hierzu werden zunächst in den Bereichen Baustofftechnologie, Trag- und Verformungsverhalten sowie Bauphysik grundlegende theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Erkenntnisse werden anschließend beim Bau von Demonstratorwänden zusammengeführt, die dann hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen geprüft werden.

Stichworte: multifunktionale Leichtbetonbauteile, Infraleichtbeton, inhomogene Eigenschaften, Aktive Dämmung, Wandaktivierung, Photokatalyse

1 Einleitung

Das dreijährige Forschungsvorhaben »Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (MultiLC)«, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), hat zum Ziel, Bauteile zu entwickeln, bei denen die Eigenschaften über den Querschnitt so angepasst werden, dass sie die jeweils geforderten Aufgaben, wie z. B. Lastabtrag und Wärmedämmung, bestmöglich erfüllen. Gleichzeitig werden diese Bauteile mit weiteren Funktionen zur positiven Beeinflussung des Wärmeschutzes und den umgebenden Luftschadstoffen versehen.

Die Motivation dieses Ansatzes liegt darin, durch effizient wirkende Materialien und Bauteile einen Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz und damit zur Nachhaltigkeit im Bauwesen zu leisten. Ausgangspunkt bildete Infraleichtbeton (engl.: Infra-Lightweight Concrete (ILC)), ein Hochleistungsleichtbeton mit einer Trockenrohdichte unter 800 kg/m^3. Aufgrund der ungewöhnlichen Kombination aus geringer Rohdichte und guter Druckfestigkeit ist es möglich, mit ILC lastabtragende und gleichzeitig wärmedämmende Sichtbetonwände aus nur einem Werkstoff auch für mehrgeschossige Gebäude herzustellen [1]. Im Rahmen von MultiLC sollen nun Leichtbeton-Wände mit über den Querschnitt verteilten Festigkeits- und Wärmedämmeigenschaften konzipiert werden, die zusätzlich mit Funktionen wie Wärmespeicherung, Wandaktivierung zur aktiven Dämmung und Photokatalyse zum Schadstoffabbau kombiniert werden (Bild 1).

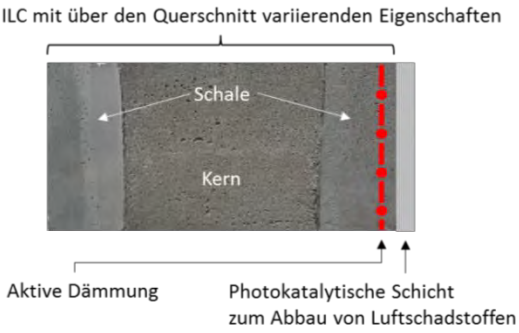


Bild 1 Schematische Darstellung eines multifunktionalen Leichtbetonbauteils mit inhomogenen Eigenschaften

Hierzu arbeitet seit Anfang 2016 ein Team aus Materialtechnologen, konstruktiven Ingenieuren und Bauphysikern aus Forschung, Industrie und Planung zunächst an den theoretischen Grundlagen (vgl. Bild 2). In drei Arbeitsgruppen (»Betontechnologie«, »Tragverhalten« und »Bauphysik«) untersuchen HeidelbergCement, Sika Deutschland, Transsolar Energietechnik, schlaich, bergermann partner und die TU Berlin Themen wie z. B. das Trag- und Verformungsverhalten, die Steuerung der Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Simulationen zur Bauteilaktivierung und Analysen zur Ökobilanz, aber auch baupraktische und marktrelevante Aspekte wie Produktionsprozesse, Kosten und konstruktive Details. Nach Erarbeitung der theoretischen Grundlagen werden die Ergebnisse durch experimentelle Untersuchungen verifiziert. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den drei Arbeitsgruppen in der letzten Projektphase beim Bau und bei der Prüfung von Demonstratoren zusammengeführt.

Am Ende steht das Ziel, monolithische Wandaufbauten mit inhomogenen Eigenschaften zu entwickeln, die sowohl dämmen als auch Lasten abtragen, gleichzeitig aktiv wärmen und kühlen, regulierend auf die Raumfeuchtigkeit wirken und darüber hinaus auch Schadstoffe zersetzen können [2].

Das Vermeiden von mehrschichtigen Wandkonstruktionen aus unterschiedlichen Materialien bietet dabei diverse Vorteile: vereinfachte Bauabläufe wirken sich positiv auf Kosten und Herstellungsenergie aus, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie der Aufwand für Rückbau und Rezyklieren werden reduziert. Der vollständige Verzicht auf brennbare Materialien erhöht die Sicherheit für die Nutzer. Das Projekt MultiLC zielt damit auf eine ganzheitliche Bauweise ab, die ressourcensparend, funktional, nachhaltig und ästhetisch ist.

Nachfolgend werden die Tätigkeiten in den drei Arbeitsbereichen Betontechnologie, Tragverhalten und Bauphysik kurz vorgestellt.

2 Betontechnologie

Um den monolithischen Querschnitt von multifunktionalen Bauteilen mit inhomogenen Eigenschaften auszustatten, wird angestrebt, einerseits Bereiche mit vergleichsweise hoher Dichte und Druckfestigkeit auszubilden, die hauptsächlich den Lastabtrag übernehmen, und andererseits Bereiche mit geringer Dichte zu definieren, die einen ausreichenden Wärmeschutz sicherstellen. Dementsprechend arbeitet der Bereich Betontechnologie (Fachgebiet (FG) Baustoffe und Bauchemie der TU Berlin sowie HeidelbergCement und Sika Deutschland) im Wesentlichen an der Konzeption von zwei Betonarten: dem lastabtragenden Schalenbeton sowie dem wärmedämmenden Kernbeton (vgl. Bild 1). Der Schalenbeton sollte dabei eine Trockenrohdichte von 800 kg/m^3 erreichen und gleichzeitig der Druckfestigkeitsklasse LC12/13 entsprechen. Der Kernbeton hingegen ist auf eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit hin zu optimieren, wobei eine Mindestdruck- und -zugfestigkeit einzuhalten ist, um Beanspruchungen aus Einbau- und Transportsituationen aufzunehmen.

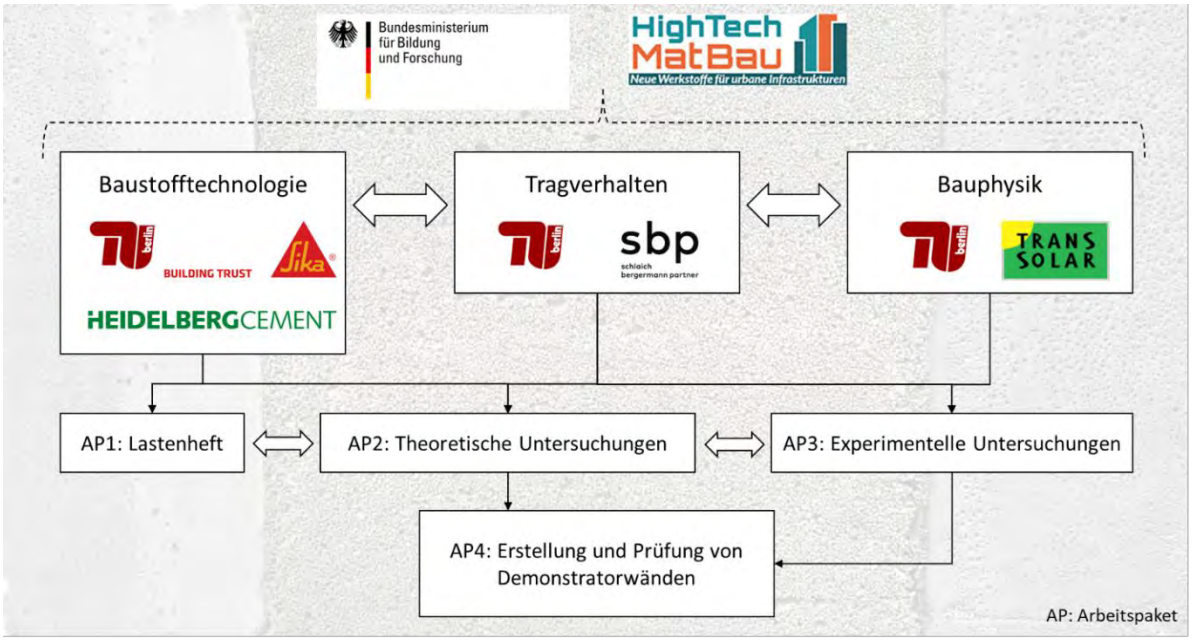


Bild 2: Projektschema MultiLC: Arbeitsgruppen und Arbeitspakete

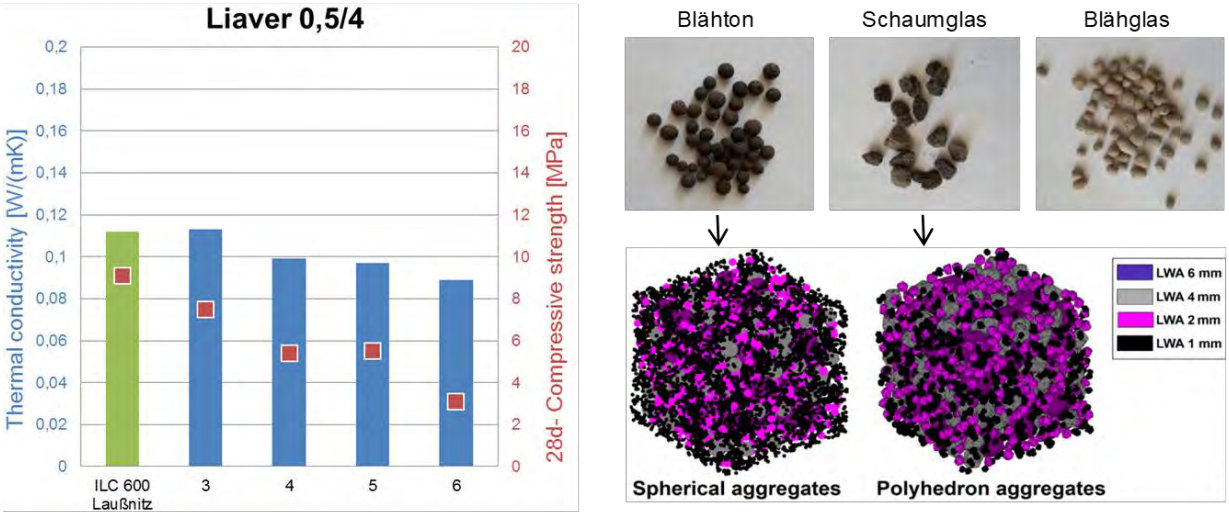


Bild 3: Exemplarische Ergebnisse der Entwicklung des Kernbetons mit Gesteinskörnung Liaver (links; Quelle: HeidelbergCement); Leichtzuschläge und deren FE-Simulation (rechts)

Um dies zu erreichen, werden neuartige Leichtmörtel- sowie Leicht- und Schaumbetonrezepturen mit entsprechender Charakterisierung der Porosität konzipiert, wobei zunächst grundlegende Varianten zur Steuerung der Porosität erforscht wurden. In Frage kommen dabei unterschiedliche natürliche und synthetische Leichtzuschläge, eingemischte Schäume sowie aktiv aufschäumende Systeme. Die Auswirkung der Eigenschaften verschiedener Leichtzuschläge wie z. B. Schaumglas, Blähton und Blähglas wurde sowohl experimentell als auch über FE-Simulationen untersucht. Exemplarische Ergebnisse mit Blähglas (hier: Liaver) für Rezepturen des Kernbetons sind in Bild 3 dargestellt.

Neben der Rezepturkonzeption werden auch Optionen zur Einbindung der Photokatalyse geprüft, die dem Abbau von Luftschadstoffen in der Umgebung dient. Zwar liegen bereits Erkenntnisse zur photokatalytischen Wirkung von Titanoxid (TiO_2) vor, diese müssen jedoch auf die neuen Rezepturen übertragen bzw. angepasst werden, da die Wirkung des Titanoxids wesentlich von den Umgebungsbedingungen abhängt. Einflussfaktoren sind z. B. das verwendete Bindemittel, das Wasser-Zement-Verhältnis, dessen Dispergierung durch Fließmittel, der Mischprozesses sowie Schaummittel und weiterer Additive.

3 Tragverhalten

Aufgabe des FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau und dem Ingenieurbüro schlaich bergermann partner ist es, das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen mit inhomogenen Eigenschaften anhand von analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen zu erforschen, um abschließend ein Bemessungskonzept ableiten zu können.

Hierbei werden Wand- und Balkenbauteile mit zwei- und dreischichtigen Bauteilkonfigurationen von Schalen- und Kernbeton betrachtet, um den vertikalen Lastabtrag sowie die Biegebeanspruchung, wie z. B. beim Einsatz als Fenstersturz, zu erfassen. Zunächst werden theoretische Untersuchungen im Hinblick auf das Normalkraft- bzw. Biege- und Querkraftverhalten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie das Riss- und Verformungsverhalten für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt. Durch anschließende experimentelle Untersuchungen werden die Berechnungsergebnisse verifiziert und ggf. Grenzen der theoretischen Anwendbarkeit der verwendeten Bemessungsansätze aufgezeigt. Auf Basis der Ergebnisse können dann angepasste Bemessungsansätze formuliert werden.

Ein wichtiger Aspekt ist die konstruktive Durchbildung der multifunktionalen Bauteile. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften wie z. B. Festigkeiten und Steifigkeiten im Bauteil gilt es, den Kraftfluss über mehrere miteinander verbundene Bauteile zu verfolgen. Besonders muss der Anschluss einer Geschossdecke in ein inhomogenes Wandbauteil betrachtet werden. Hierzu werden zunächst numerische Berechnungen am Gesamtsystem eines

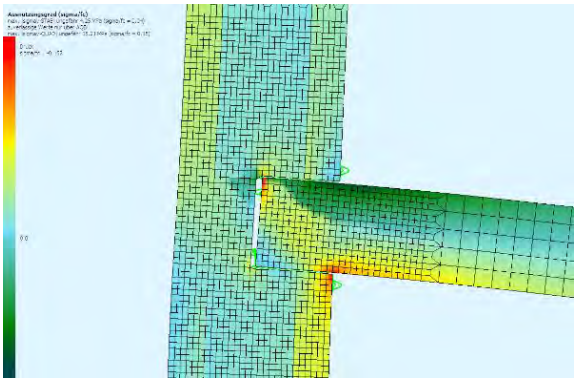


Bild 4: Numerische Simulation Wand-Decken-Knoten mit Auflast, gelenkige Lagerung

Bild 5: Herstellung des dreischichtigen Demonstrators mit Bauteilaktivierung in Form von Kapillarrohrmatten (links); fertiggestellte Demonstratorwand für den EOTA Prüfstand (rechts) (Quelle: HeidelbergCement)

mehrgeschossigen Referenzgebäudes aus dem Geschosswohnungsbau [3] durchgeführt. Darauf aufbauend wird der Wand-Decken-Knoten unter Ansatz eines dreischichtigen Wandaufbaus aus Schalen- und Kernbeton sowie einer Normalbeton-Geschossdecke modelliert (Bild 4). Anhand des Modells werden verschiedenen Anschlussvarianten untersucht, die sich zwischen den Grenzfällen eines möglichst gelenkigen und eines annähernd biegesteifen Anschlusses bewegen, um hieraus die optimale Variante zu ermitteln. Abschließend wird auf Basis der Ergebnisse ein Stabwerkmodell untersucht, um die Bemessung eines solchen Knotens auch ohne aufwendige numerische Berechnungen zu ermöglichen.

4 Bauphysik

Die Untersuchungen im bauphysikalischen Bereich gliedern sich in drei Themenfelder. Neben der bauphysikalischen Bewertung der gewählten Bauteilkonfigurationen werden bauphysikalische Modellierungen und Simulationen vorgenommen sowie die Nachhaltigkeit der Konstruktion analysiert. Die Aufgaben werden in Zusammenarbeit vom FG Bauphysik und Baukonstruktionen und der Transsolar Energietechnik GmbH durchgeführt.

In einem ersten Schritt werden thermische und hygrische Kennwerte ermittelt, um diese als Eingangswerte für die numerische Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtstromes zur Verfügung zu stellen. Aufgrund der inhomogenen Eigenschaften der MultiLC-Bauteile gilt es hier, Eigenschaften wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit nicht nur auf der Mikroebene einzelner Betonarten, sondern auch auf der Mesoebene des Bauteils zu bestimmen. Anhand der hierauf aufbauenden numerischen Simulationen werden anschließend die Bauteile im Hinblick auf ihre Eignung für verschiedene klimatische Randbedingungen untersucht und bewertet.

Die Nachhaltigkeit der entworfenen Leichtbetonkonstruktionen wird anhand von vergleichenden Ökobilanzen beurteilt. Hierzu werden zunächst die verschiedenen Indikatoren für das MultiLC-Bauteil selbst betrachtet. Die Ergebnisse gehen in die Ökobilanz eines mehrgeschossigen Referenzgebäudes ein (vgl. auch Abschnitt 3). Für dasselbe Gebäude werden auch Bilanzen mit herkömmlichen Wandkonstruktionen wie z.B. WDVS erstellt, die dann als Vergleichsbasis herangezogen werden.

Einen wichtigen Bestandteil eines MultiLC-Bauteils stellt die Integration der Bauteilaktivierung (Bild 5) dar. Im Gegensatz zur üblichen Praxis dient diese hier dem Ziel, als »Aktive Dämmung« einen Beitrag zur wärmedämmenden Wirkung des Wandbauteils zu leisten. Hierdurch ist es möglich, die Wanddicke zu verringern, Baumaterial einzusparen und gleichzeitig weiterhin die Anforderungen an den Wärmeschutz zu erfüllen. Im Rahmen der Untersuchungen werden verschiedene Aspekte betrachtet, wie z. B. die Lage der Aktivierungsebene im Querschnitt der Wand oder die Vorlauftemperatur, um die Wirkungsweise optimieren zu können. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass gegenüber herkömmlicher Betonkernaktivierung der Infraleichtbeton eine geringere speicherfähige Masse für Wärme besitzt und auf eine geringe Wärmeleitfähigkeit hin entworfen wurde. Der Einfluss der Wandaktivierung lässt sich abschließend durch einen »effektiven U-Wert« ausdrücken, der den Wärmedurchgang durch das gesamte, inhomogene Bauteil inkl. aktiver Dämmung beschreibt.

5 Demonstratoren

Die Erkenntnisse aus den einzelnen Themenbereichen werden im letzten Abschnitt des Projekts zu-

sammengeführt, um Demonstratorwände im Maßstab 1:1 herzustellen. Diese werden im Fassadenprüfstand des FG Bauphysik und Baukonstruktion der TU Berlin (Bild 6) im Hinblick auf ihre Dauerhaftigkeit untersucht. Der Fokus liegt dabei auf dem Langzeitverhalten der inhomogenen Schichten bzw. Strukturen unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen. Basis der Prüfungen bilden die Regelungen und Anforderungen für den Nachweis der Verwendbarkeit von neuen Bauprodukten gemäß EOTA (European Organisation for Technical Assessment).
Die ersten Demonstratorwände wurden bereits im März 2017 im Fertigteilwerk Laußnitz der Heidelberger Betonelemente Fabrik hergestellt (Bild 5) und werden aktuell an der TU Berlin getestet.

6 Ausblick

Der Großteil der theoretischen und experimentellen Untersuchungen der drei Arbeitsgruppen wird bis Ende 2017 abgeschlossen sein. Das letzte Jahr bis zum Projektabschluss Ende 2018 wird hauptsächlich für die Herstellung und Prüfung von weiteren Demonstratoren genutzt. Dabei handelt es sich zum einen um zusätzliche Wandbauteile für den EOTA-Fassadenprüfstand. Zum anderen werden Prüfkörper produziert, die zur Untersuchung der Eignung von multifunktionalen Bauteilen bei Schlagregenbeanspruchung dienen. Getestet werden hierbei verschiedene Varianten von Hydrophobierungen sowie unterschiedliche Fensteranschlüsse. Die Prüfungen werden im Schlagregenprüfstand des FG Bauphysik und Baukonstruktion in Anlehnungen an Anforderungen für den Nachweis der Verwendbarkeit von neuen Bauprodukten vorgenommen. Darüber hinaus werden kleinere Demonstratoren hergestellt, um exemplarisch die baukonstruktive Gestaltung im Hinblick auf z. B. Fugen und Deckenanschlüsse zu testen.

Der abschließende Bericht zur Dokumentation der Ergebnisse des Gesamtprojekts wird Ende 2018 erwartet.

Bild 6: EOTA Fassadenprüfstand der TU Berlin

Literaturverzeichnis

[1] Schlaich, M., Hückler, A.: Infraleichtbeton 2.0. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 757–766.

[2] Lösch, C., Stephan, D., Schlaich, M., Vogdt, F. U.: Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (MultiLC). Beitrag zum »Tag der Forschung« des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins (DBV), 31.10.2017.

[3] Leibinger, R., Schlaich, M., Lösch, C., Rieseberg, P., Ballestrem, M.: Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Fraunhofer IRB Verlag 2017.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben »Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (MultiLC)« wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter den Förderkennzeichen 13XP5010A bis 13XP5010E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

NaHiTAs

HighTech MatBau

Nachhaltiger HighTech-Asphalt

Schadstoff- und lärmmindernd mit neuer Verarbeitung und Überwachung

Sandra Weigel, Alexander Babiak, Dietmar Stephan, TU Berlin, Sebastian Czaja, TPA GmbH

Kurzfassung: Das Ziel dieses Projekts ist die Erarbeitung einer nachhaltigen Fahrbahnoberfläche in Asphaltbauweise, die neben den standardmäßigen Anforderungen zusätzlich stickoxid- und lärmmindernde Eigenschaften aufweist. Dafür soll eine synthetische Gesteinskörnung auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht werden, die zum einen aufgrund von photokatalytischen Eigenschaften zum Abbau von Stickoxiden führt. Zum anderen soll durch eine gezielte Positionierung der Gesteinskörner eine lärmmindernde Textur erzeugt werden. Weiterhin werden Konzepte und Methoden zur Erhaltung und Verbesserung lärmmindernder Eigenschaften bestehender dichter Deckschichten erarbeitet.
Im Rahmen dieses Projekts steht neben der Erarbeitung zudem die maschinentechnische Umsetzung der Konzepte im Fokus, sodass für die gezielte Positionierung der Gesteinskörner bereits verschiedene Ablegeeinrichtungen konzipiert und teilweise gebaut wurden. Bezüglich der Maschinentechnik wird zudem eine grundsätzliche Optimierung des Einbauprozesses von Asphalt angestrebt, was durch innovative Automatisierungs- und Qualitätsüberwachungsmodule verwirklicht werden soll.

Stichworte: Asphalt, Stickoxidabbau, Photokatalyse, Lärmminderung, Nachhaltigkeit, Einzelkornablage, Automatisierung und Überwachung des Asphalteinbaus

1 Motivation und Ziele

In deutschen Städten steigen aufgrund der stetig wachsenden Verkehrszahlen auch zunehmend die Belastungen auf die Umwelt und die Gesundheit des Menschen. Zwei sehr aktuelle und schwerwiegende Aspekte dieser Belastungen bilden die verkehrsbedingten hohen Stickoxidgehalte in der Luft sowie die hohe Lärmentwicklung entlang der Straßen, für die im Rahmen des NaHiTAs-Projekts Reduzierungsmaßnahmen erarbeitet werden. Das Ziel des Projekts ist die Erforschung einer nachhaltigen Fahrbahnoberfläche aus Asphalt, die sowohl stickoxid- als auch lärmmindernde Eigenschaften aufweist. Zum Erreichen dieser Eigenschaften soll auf die Oberfläche der Asphaltfahrbahn eine spezielle, synthetische Gesteinskörnung aufgebracht und dauerhaft in die Deckschicht eingebunden werden. Bei dieser synthetischen Gesteinskörnung handelt es sich um einen Ultrahochleistungsbeton (UHPC), der in Form von Blöcken hergestellt und anschließend gezielt zerkleinert wird. Als Besonderheit enthält dieser UHPC Titandioxid (TiO_2), das als photokatalytisch aktives Material Stickoxide in der Luft abbauen kann. Dafür muss der Photohalbleiter TiO_2 zunächst mithilfe von UV-Strahlung angeregt werden, wobei durch die hervorgerufenen intermolekularen Prozesse in Gegenwart von Sauerstoff und Wasser Radikale gebildet werden. Diese Radikale reagieren wiederum mit den Stickoxiden (Stickstoffmonooxid NO, Stickstoffdioxid NO_2) in der Luft, die auf diese Weise in harmloses Nitrat umgewandelt werden. Durch die natürliche Witterung wie z. B. Regenereignisse werden diese Nitrate anschließend von der Fahrbahn abgewaschen. Die Menge des gebildeten Nitrats liegt dabei merklich unterhalb der geltenden Grenzwerte, sodass diese keine negativen Umweltauswirkungen aufweisen.
Durch das Aufbringen der photokatalytisch aktiven Gesteinskörnung auf die Asphaltfahrbahn können somit die Stickoxide in der Luft reduziert werden.

Die lärmmindernden Eigenschaften der Fahrbahn werden durch eine gezielte Anordnung der Gesteinskörner auf der Fahrbahn erreicht, wofür zum einen Einzelkornablegeeinheiten als optimierte Abstreuvorrichtungen konzipiert und gebaut wurden. Mithilfe dieser Vorrichtungen kann eine definierte Oberflächentextur hergestellt werden, die sowohl durchgehend lärmmindernd als auch dauerhaft ist. Zum anderen wird eine zweifache Abstreuung erprobt, durch die eine möglichst ebene und doch griffige Oberfläche entsteht, die zu einer weiteren Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs führt. Zusätzlich sollen bestehende lärmarme sowie zum Profilausgleich feinstgefräste Deckschichten mit einer Beschichtung aus modifizierten Bitumenschlämmen versehen werden, um eine Reduzierung der Lärmentwicklung zu erreichen.
Neben der Erarbeitung der Materialien und Konzepte ist zum Erreichen einer photokatalytischen und lärmmindernden Fahrbahnoberfläche weiterhin der zielgerichtete Einbau bzw. die zielgerichtete Umsetzung dieser Konzepte entscheidend. Der Einbau und die Umsetzung bilden daher einen weiteren Schwerpunkt des Projekts, wobei für die gezielte Positionierung der Gesteinskörner die bereits genannte, innovative Einheit zur Einzelkornablage sowie zur Dosierung der Ausbringmenge erarbeitet wird. Zusätzlich zur Umsetzung der innovativen Eigenschaften soll im Rahmen dieses Projekts zudem eine grundsätzliche Optimierung des Einbauprozesses verfolgt werden. Dieser sieht verschiedene Automatisierungs- und Überwachungseinheiten vor, um während des Einbaus mithilfe einer kontinuierlichen Rückkopplung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand der Asphaltfahrbahn ein frühzeitiges Korrigieren von Fehlern zu ermöglichen.
Insgesamt sieht das NaHiTAs-Projekt somit ein umfassendes Konzept zur Erarbeitung einer Fahrbahnoberfläche mit innovativen Eigenschaften vor, wobei durch die Reduzierung der Stickoxide und des Lärms ein Beitrag zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit des Menschen angestrebt wird.

2 Photokatalytischer Stickoxidabbau

2.1 Synthetische Gesteinskörnung

Die Grundlage des NaHiTAs-Projekts bildet die synthetisch hergestellte Gesteinskörnung aus einem Ultrahochleistungsbeton (UHPC), in dem gleichmäßig über das gesamte Volumen photokatalytisch aktives TiO_2 verteilt ist (vgl. Bild 1). Durch dieses Vorgehen befinden sich auch bei kontinuierlichem Abrieb der Oberfläche durch die Verkehrsbelastung stets TiO_2-Partikel an der Kornoberfläche, die dort mit UV-Strahlung und den Stickoxiden in Berührung kommen und diese abbauen kann.

Bild 1 Synthetisches Granulat aus gebrochenen UHPC

Die Rezeptur des UHPC wurde in verschiedenen Schritten optimiert, um neben der photokatalytischen Aktivität auch die Materialanforderungen einer Gesteinskörnung für den Straßenbau zu erreichen. Die Festigkeitsanforderungen wurden dabei durch Untersuchungen der Polierresistenz und der Griffigkeit mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze sowie der Schlagzertrümmerung überprüft. Die Bewertung der photokatalytischen Aktivität erfolgt sowohl mithilfe des standardisierten Verfahrens nach DIN ISO 22197-1 als auch mithilfe von speziellen Feldversuchen (vgl. Abschnitt 5, Bild 7), mit denen bereits mittlere Abbauraten der erarbeiteten Asphaltdeckschicht von 13,8 % für NO (Maximalwert bei optimalen Witterungsbedingungen: 25,8 %) sowie von 9,1 % für NO_2 (Maximalwert bei optimalen Bedingungen: 16,6 %) festgestellt werden konnten. Mithilfe von Laborversuchen sowie speziellen Feldversuchen lässt sich demnach der photokatalytische Abbau der Stickoxide durch das erarbeitete Granulat nachweisen. Um von diesem Testmaßstab auf die Stickoxidreduzierungen unter realen Bedingungen schließen zu können, werden im Rahmen dieses Projekts zusätzlich photokatalytische Simulationen in Form von numerischen Modellierungen durchgeführt. Mithilfe dieser Simulationen lässt sich für beliebige Straßenzüge abschätzen, wie hoch das Minderungspotential der Stickoxide durch den Einbau der erarbeiteten photokatalytischen Fahrbahnoberfläche ist (vgl. Bild 2). Derzeit laufen umfassende Validierungsversuche für diese Modellierungen, weshalb momentan noch keine Aussagen über mögliche Minderungspotentiale möglich sind.
Zusätzlich zu den materialspezifischen Eigenschaften wird weiterhin auch die Einbindung der erarbeiteten Gesteinskörnung in die Asphaltoberfläche untersucht, um die Dauerhaftigkeit der erarbeiteten Fahrbahn bewerten zu können.

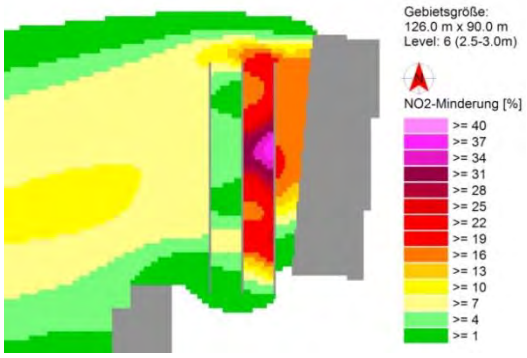


Bild 2 Beispiel zur Modellierung des NO_2-Minderungspotentials

2.2 Auswirkungen auf das Bitumen

Neben der Umwandlung der Stickoxide kann infolge der Photokatalyse auch ein Abbau organischer Materialien erfolgen, was u. a. bei Wandfarben beobachtet wurde. Für eine photokatalytische Asphaltoberfläche ergibt sich somit die potentielle Gefahr, dass durch die Photokatalyse das organische Bindemittel des Asphalts angegriffen und sich somit eine verstärkte oder beschleunigte Bitumenalterung einstellt. Um diese potentielle Gefahr zu bewerten, wurde der Einfluss des TiO_2 auf die Bitumenalterung mithilfe umfassender physikalischer und chemischer Verfahren untersucht. Dabei wurde eine strukturelle Veränderung des Bitumens festgestellt, wenn dieses bei Temperaturen um 150 °C mit dem TiO_2 vermischt wird oder bei intensiver UV-Strahlung mit dem TiO_2 in Kontakt kommt. Infolge einer anschließenden Alterung konnten jedoch sowohl physikalisch als auch chemisch gleichbleibende oder sogar geringere Alterungsauswirkungen im Bitumen festgestellt werden. Infolge des verwendeten TiO_2 sind somit keine negativen Auswirkungen auf die Alterung des Bitumens zu erwarten, sodass die Dauerhaftigkeit des Asphalts durch die photokatalytische Gesteinskörnung nicht beeinträchtigt werden sollte.

3 Lärmminderung

3.1 Konzeption einer lärmarmen dauerhaften Textur

Neben den photokatalytischen Eigenschaften ist eines der Hauptziele des Projekts die Herstellung und Erhaltung geräuschmindernder Asphaltdeckschichten. Dies soll durch die grundlegende Konzeption der Oberflächenstruktur sowie einer gezielten maschinentechnischen Umsetzung erreicht werden.

Einen weiteren, innovativen Ansatz stellt das Einbringen der synthetischen Gesteinskörnung über zwei Abstreuvorgänge dar. Dadurch soll eine möglichst hohe Flächendichte des photokatalytischen Materials sowie eine akustisch hoch wirksame Textur erreicht werden. Hierbei erfolgen zwei nacheinander geschaltete Abstreuvorgänge mit Granulaten unterschiedlicher Größe auf die heiße Deckschicht bzw. einem zusätzlichen Haftkleber. Durch den folgenden Walzvorgang ist eine dauerhafte Einbindung des Materials mit einer definierten Oberflächentextur gegeben.

3.2 Asphaltschlämmen zur Sanierung

Neben der Konzeption einer optimierten Deckschicht für den Neueinbau wird weiterhin eine Erhaltungsmaßnahme erarbeitet, die bereits liegenden Asphaltdeckschichten eine akustische Aufwertung verleiht. Dafür ist eine dünne Beschichtung von bestehenden Asphaltdeckschichten mit einer Asphaltschlämme vorgesehen, wobei die Gesteinskörnung dieser Schlämmen eine definierte Sieblinie aufweist. In ersten Testversuchen konnte die Wirksamkeit dieser Oberflächenbehandlung bereits festgestellt werden (vgl. Bild 3), wobei Lärmminderungen von bis zu 2,5 dB erreicht wurden (CPX-Pegel). Zur weiteren Optimierung soll als Voraussetzung der Methode ein Profilausgleich durch Feinstfräsen angesetzt werden, was in derzeit laufenden Untersuchungen überprüft wird.

Bild 3 Aufbringen von modifizierten Asphaltschlämmen in Handeinbau

3.3 Zustandserfassung/-bewertung

Ein weiteres Ziel dieses Projekts bildet die Erfassung und Bewertung der akustischen Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche, um deren Erhaltungsbedarf abschätzen zu können. Zur Beurteilung der akustischen Nachhaltigkeit von lärmarmen Fahrbahnoberflächen ist dafür zunächst ein Modell zu erarbeiten, in dem die Veränderungen der Geräuschemissionen über die Zeit aufgestellt werden. Zur Erstellung dieses Modells wird eine Zustandsbewertung mithilfe von CPX-Messungen nach dem Prinzip der im

Straßenwesen gültigen ZEB aufgebaut. Dafür werden Lärmmessdaten aus ganz Deutschland und von verschiedenen Deckschichtarten ausgewertet, die das Aufstellen statistischer Aussagen ermöglichen. Mehrfache Messungen mit dem CPX-Verfahren erlauben dabei eine kontinuierliche Anpassung der Voraussagen und somit die Erstellung einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Strategie für Sanierungsmaßnahmen.

4 Maschinentechnik

Bezüglich der maschinentechnischen Umsetzung werden im Rahmen dieses Projekts sowohl innovative Einbautechniken für die erarbeiteten Konzepte als auch eine grundsätzliche Optimierung des Einbauprozesses betrachtet.
Für die zielgerichtete Positionierung der Gesteinskörner wurde eine Einzelkornablegeeinrichtung erarbeitet, mit der die Körner durch eine spezielle geformte Walze an einer definierten Position abgelegt werden (vgl. Bild 4).

Bild 4 Einzelkornablegeeinrichtung

Unter dem Fokus einer gleichmäßigen Verteilung der Gesteinskörnung wurde zudem eine alternative Ablegeeinheit erarbeitet, die eine gezielte Steuerung der Ausbringmenge sowie die Aussparung von nicht abzustreuenden Bereichen, wie bspw. Kanalschachtabdeckungen, ermöglicht (vgl. Bild 5).

Bild 5 Ablegeeinheit zur Steuerung der Ausbringmenge und zur Verwirklichung von Aussparungen

Eine grundsätzliche Optimierung des Einbauprozesses soll durch die Implementierung von Automatisierungs- und Qualitätsüberwachungsmodulen erreicht werden. Das Ziel ist dabei eine kontinuierliche Rückkopplung zwischen Sensoren, die den Ist-Zustand aufnehmen, und Steuerungselementen, die diese mit dem Soll-Zustand vergleichen. Stimmen Ist- und Soll-Zustand nicht überein, soll dies möglichst frühzeitig erkannt und entsprechend gegenreguliert werden. Als Gütekriterien werden dabei die Einbaubreite, die Einbaudicke, das Einbauprofil, die Längsebenheit und der Verdichtungsgrad herangezogen. Einbaudicke, Einbauprofil und die Längsebenheit sollen dabei über GNSS-Koordinaten sowie eine Laserreferenz erfasst werden. Für die Einbaubreite sind hingegen Messungen über den Kantenformer der Walze angedacht, während der Verdichtungsgrad über das Einbauprofil und die Masse des eingebrachten Mischguts berechnet werden soll.
Bezüglich der Oberflächentextur ist bereits eine Echtzeitbewertung der Qualität mithilfe eines selbstfahrenden Messsystems möglich, das unmittelbar nach dem Einbau auf der noch heißen Deckschicht eingesetzt werden kann (vgl. Bild 6). Dieses Messsystem erlaubt die Erfassung der Makro- und Megatextur sowie der Ebenheit und kann ebenfalls als Rückkopplung für den Einbauprozess verwendet werden.

Bild 6 Selbstfahrendes Messsystem zur Erfassung der Textur

5 Demonstratoren

Die im Rahmen des NaHiTAs-Projekts erarbeiteten Materialien, Konzepte und Maschinentechniken werden in einer Vielzahl von Demonstratoren überprüft. So wurde bspw. ein Einbausimulator mit einer Einbaubreite von 0,5 m erarbeitet, der erste Einbautests sowie erste Tests der Ablegeeinheit mit regulierbarer Ausbringmenge ermöglichte (vgl. Bild 7).

Bild 7 Einbausimulator

Weiterhin wurden auf den Geländen verschiedener Projektpartner Einbautests durchgeführt, wobei insbesondere zur Bewertung der photokatalytischen Aktivität der Fahrbahnoberfläche ein einer Straßenschlucht nachempfundener Canyon zur Verfügung steht (vgl. Bild 8). Dieser Canyon umfasst zwei Teilbereiche, in denen photokatalytisch aktive und photokatalytisch inaktive Materialien verglichen werden können. Mithilfe dieses Canyons lässt sich somit die stickoxidreduzierende Wirkung der Fahrbahnoberfläche unter realitätsnahen Bedingungen messen.

Bild 8 Canyon in Form von Straßenschluchten

Die Einbautests auf den Geländen der verschiedenen Projektpartner erlaubten zudem die Durchführung von CPX-Messungen, wodurch neben der Bewertung der photokatalytischen Aktivität bzw. der Einbautechnik eine Beurteilung der Lärmminderung möglich wurde.
Bezüglich der Erprobung der Asphaltschlämmen zur Lärmreduzierung an gealterten dichten Deckschichten konnten Feldversuche auf einer Berliner Stadtstraße durchgeführt werden.

6 Abschließende Betrachtung

Das Projekt NaHiTAs umfasst einen ganzheitlichen Ansatz zur Erweiterung der Asphaltfahrbahnoberfläche um stickoxid- und lärmmindernde Eigenschaften. Dabei wird die Erarbeitung der Materialien und Konzepte durch Simulationen begleitet, mit denen u. a. Aussagen über die Reduzierung der Stickoxide möglich sind. Zudem wurden potentielle Wechselwirkungen zwischen der erarbeiteten Gesteinskörnung und dem Bindemittel des Asphalts untersucht, um die Auswirkungen des TiO_2 auf das Bitumen bewerten zu können.
Bezüglich der Lärmreduzierung werden weiterhin Verfahren erarbeitet, um bestehende akustisch gealterte sowie gefräste Asphaltdeckschichten lärmmindernd aufzuwerten. Zur Beurteilung der Zunahme von Geräuschemissionen verschiedener Asphaltoberflächen erfolgt zudem eine Ermittlung von Verhaltensvoraussagen.
Weiterhin wird die Umsetzung der Konzepte durch die Erarbeitung innovativer Maschinentechnik gewährleistet und zudem grundsätzlich der Einbauprozess des Asphalts durch verschiedene Automatisierungs- und Überwachungsmodule optimiert.
Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N13109, 13N13110 und 13N13113 bis 13N13120 gefördert.

Beteiligte Partner

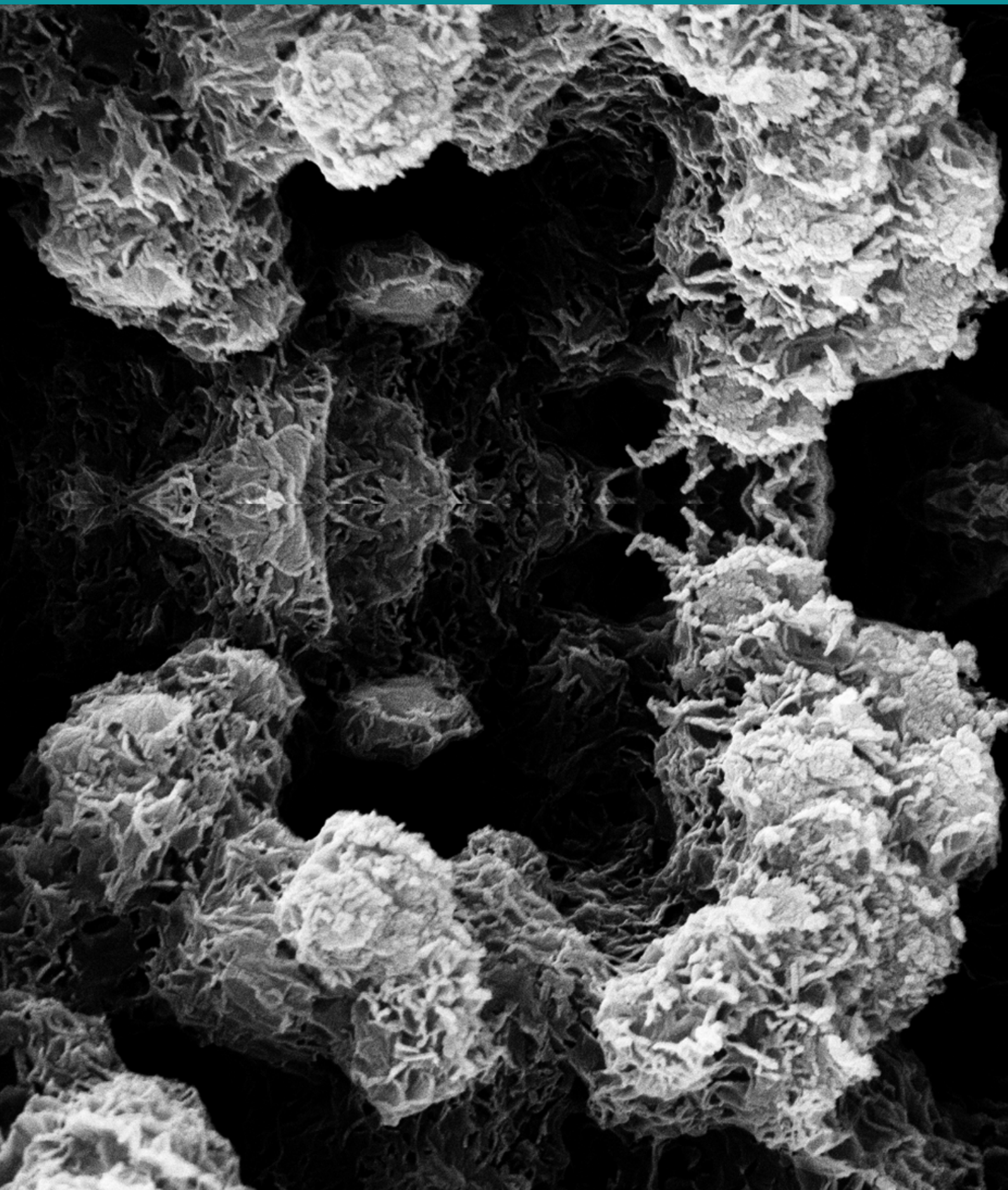
- TPA GmbH – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation
- TU Berlin – Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie
- F.C. Nüdling Betonelemente & Co. KG
- Asphalta Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH
- Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG
- Müller-BBM GmbH
- Universität Kassel – Sachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen/Chemie mesoskopischer Systeme
- TH Köln – Institut für Bau- und Landmaschinentechnik
- Bomag GmbH
- MOBA Mobile Automation AG

Assoziierte Partner

- Bundesanstalt für Straßenwesen BASt
- Kronos International, Inc.

NAPOS

HighTech MatBau



Nanoporöser druckfester Porenbetonstein

Hergestellt unter Verwendung von Calciumhydrosilikat-Binder

A. Stumm, M. Achternbosch, E. Nieke, P. Stemmermann, U. Schweike

Kurzfassung: Im Lebenszyklus eines Gebäudes entfällt der größte Energieverbrauch auf die Nutzungsphase. Alleine für Raumwärme bzw. Raumkühlung werden etwa 30 % des Energieverbrauchs in Deutschland aufgewendet. Das Ziel des Projekts NAPOS ist es daher, einen massiven, homogenen und nanoporösen Baustein auf Basis von Porenbeton zu entwickeln. Dieser sollte sowohl eine vollwertige Wärmedämmfunktion und erhöhte Tragfähigkeit aufweisen als auch möglichst leicht und vollständig rezyklierbar sein.
Hierzu wurde ein Verfahren zur Herstellung von Leichtzuschlägen, das auf optimierten, hydraulisch aktiven Calcium-Hydrosilikat-Bindern (h-CHS-Bindern) basiert, entwickelt. Diese Leichtzuschläge werden der Porenbetonmischung zugegeben. Die Grenze der Zuschlagmenge liegt derzeit bei 40 M.-%. Als besonders gut eignen sich Granalien mit einem Korndurchmesser kleiner 0,5 mm. Verfahrenstechnisch ist der »NAPOS-Ansatz« umsetzbar. Durch das Zudosieren von konfektioniertem Leichtzuschlag kann die Wärmeleitfähigkeit des Porenbetons abgesenkt werden. Gleichzeitig tritt aber eine Verschlechterung der hygrischen Eigenschaften ein. Dies führt zu einem höheren Feuchtezuschlag Fm (DIN EN 1745), woraus ein höherer Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit resultiert. Ebenfalls nachteilig zu bewerten ist der Abfall der Druckfestigkeit. Im Ergebnis konnten während des Projektzeitraums nicht alle angestrebten Ziele erreicht werden.
Die Berechnungen zur Technikfolgeabschätzung zeigen jedoch, dass es sich lohnt, diesen Ansatz auch zukünftig weiter zu verfolgen, wenn es gelingt, die stofflichen Eigenschaften der CSH- Granalien zu verbessern.

Stichworte: Porenbeton, hydraulisches Calciumhydrosilikat, Nanoporosität, Druckfestigkeit, Wärmedämmung, Rezyklierbarkeit

1 Motivation

Deutschland hat mit der aktuellen EnEV 2014/ EnEV 2016 die europäische Gebäuderichtlinie nur teilweise umgesetzt. Diese EU-Richtlinie fordert, dass die Mitgliedsstaaten ab 2021 nur noch Niedrigstenergie-Neubauten genehmigen, deren Definition national aber noch nicht umgesetzt ist. Am 14. November 2016 wurde vom Bundeskabinett zudem der Klimaschutzplan 2050 verabschiedet. Danach muss der Bestand an Gebäuden bis 2050 nahezu klimaneutral saniert sein. Die mit diesem Zielhorizont implizierten Anforderungen ($U < 0{,}15$ W/m²K) können mit den heutigen Dämmstoffsystemen nur bei Inkaufnahme von Gesamtwandstärken inkl. Dämmung von mindestens 40-45 cm realisiert werden. Unter dem Gesichtspunkt eines integralen Ansatzes, der Ressourcen- und Energieeffizienz bzw. Recyclingfähigkeit mit berücksichtigt, ist die derzeitige Entwicklung bei den Dämmstoffen als kritisch zu betrachten, da für die derzeitigen Verbundsysteme Rohstoffe eingesetzt werden, die einen großen energetischen Rucksack haben und meist teuer sind. Als Beispiel seien expandiertes und extrudiertes Polystyrol (EPS, XPS) bzw. als mineralischer Werkstoff SiO_2-basierte Aerogele genannt.
Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung massiver homogener Baustoffe aus mineralischen Rohstoffen von Interesse, die neben der Wärmedämm- auch im stärkeren Maße Tragefunktionen übernehmen können. Das Projekt NAPOS zielt auf solch einen neuen wärmedämmenden Massivbaustoff für Gebäude, auf Basis von Porenbeton. Im Rahmen des Projektes soll ein massiver nanoporöser Baustein entwickelt werden, der neben der Funktion als tragende Struktur eine vollwertige Wärmedämmfunktion nach Passivhausstandart ohne zusätzliches

Wärmedämmverbundsystem gewährleistet. Der neue Baustoff soll aus weithin verfügbaren, mineralischen Rohstoffen energieeffizient und dezentral herstellbar sein. Er ist chemisch homogen und somit leicht und vollständig rezyklierbar. Damit werden natürliche Ressourcen gespart und Abfälle vermieden.

2 Ansatz

Der Schlüssel zur Reduktion der Wärmeleitung von Porenbeton liegt in der Verkleinerung der Festkörper- und Gaswärmeleitfähigkeit. Die Festkörperwärmeleitfähigkeit lässt sich durch einen optimierten Umsatz der eingesetzten Rohstoffe zu Calcium-Silikat-Hydraten, sog. C-S-H Phasen reduzieren. Für die Gaswärmeleitfähigkeiten sind die Porosität und das Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle zum Porendurchmesser (Knudson-Zahl) entscheidend. Die Einbindung von Leichtzuschlägen aus C-S-H mit homogener nanoporöser Zellmorphologie bei niedriger Dichte und hinreichender mechanischer Stabilität in die Porenbetonmatrix verspricht, die Materialeigenschaften des Produktes Porenbeton deutlich zu verbessern, ohne Materialgrenzen und chemische Inhomogenitäten zu induzieren. Das Verfahren zur Herstellung von Porenbeton bleibt nahezu unverändert.

3 C-S-H-Leichtzuschlag

Für eine nachhaltige Gesamtbilanz werden neue, ressourceneffiziente, hydraulisch aktive Calcium-Hydro-Silikat-Binder (h-CHS-Binder, »Celitemente«) anstelle von konventionellem Zement eingesetzt. Bei der Hydratation von h-CHS-Bindern entstehen reine CSH-Körper mit Poren im Nanometer-Bereich [Bild 1]. Um den für dieses Vorhaben optimalen h-CHS Binder zu identifizieren, wurden in einem ersten Schritt die Bildungsbedingungen und Strukturen von h-CHS-Bindern mit unterschiedlichen C/S-Werten im Labormaßstab ermittelt. Im Ergebnis konnte ein für das Vorhaben ideales Material identifiziert werden, welches beim Hydratisieren ein nanoporöses Porengefüge, mit Porendurchmessern kleiner als 50nm, ausbildet und eine ähnliche Zusammensetzung wie die Matrix des Porenbetonsteins besitzt. Bild 1 zeigt den Aufbau hydratisierter Granalien. Erkennbar ist die offenporige Mikrostruktur. Der vollständige Verlauf der Hydratationsreaktion ist anhand der ausgeprägten Morphologie der Hydratationsprodukte (C-S-H-Phasen) nachweisbar. Mit diesen Materialien wurden erste Testprobenkörper bei der Fa. Xella hergestellt. Die Bilder 2 und 3 verdeutlichen die Morphologie der ausgehärteten Proben. Es zeigt sich, dass die Zugabe von Granalien die Ausbildung der Poren während der Herstellungsprozesses von Porenbeton nicht beeinträchtigt. Große Einschlüsse von z. B. nicht reagiertem Quarz, die in der Referenzprobe erkennbar sind, wurden nicht beobachtet.

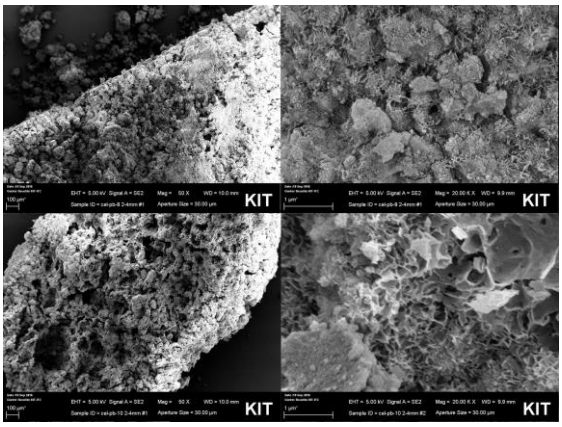


Bild 1 Elektronenmikroskopische Aufnahmen von CSH-Granalien [Quelle: ITC, KIT]

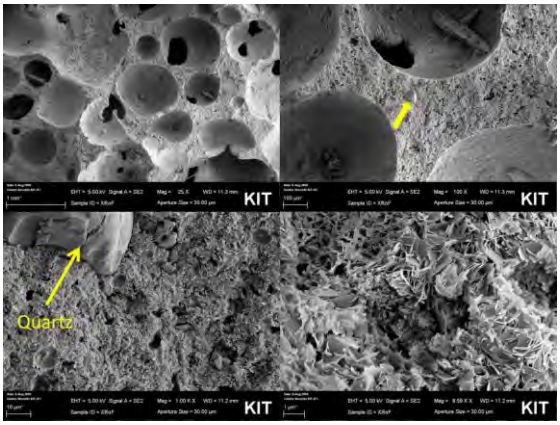


Bild 2 Porenbeton Referenzprobe [Quelle: ITC, KIT]

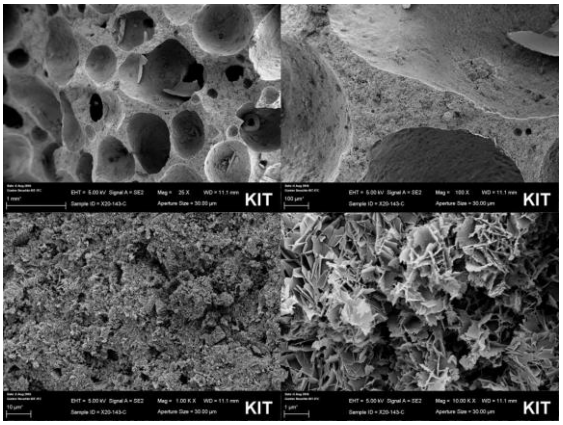


Bild 3 Porenbeton mit Einsatz von ausgehärteten Granalien [Quelle: ITC, KIT]

3.1 Herstellungsverfahren

Um die benötigten Materialmengen für die angestrebten Großversuche und Applikationen zur Verfügung stellen zu können, wurde von der Celitement GmbH auf Basis der Labordaten ein Herstellungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, Materialmengen von mehreren 100 kg zu produzieren. Die Produktion dieses Leichtzuschlags besteht aus 2 Stufen:

1. Die Bereitstellung von h-CSH ($Ca_{1,25}[HSiO_4]y[H_2Si_2O_7]z$) und
2. die Produktion des Leichtzuschlags. Bild 4 zeigt schematisch diese beiden Prozessketten. Nach dem Zudosieren von Wasser zu h-CSH wird in einem Granuliermischer ein Grünkörper-Granulat erzeugt, das zu dem nanoporösen CSH-Granulat hydratisiert. Abschließend erfolgt eine Siebung, um ausgewählte Fraktionen weiterverwenden zu können.

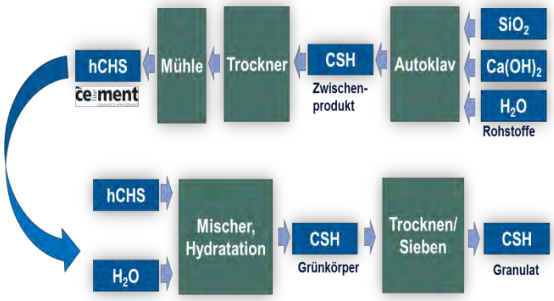


Bild 4 Schematisches Fließbild der Prozesskette zur Herstellung von nanoporösem Leichtzuschlag auf Basis von h-CHS. [Quelle: Celitement]

3.2 Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung

Da zu Beginn des Projekts nur Kleinmengen an CSH-Leichtzuschlag zur Verfügung gestellt werden konnten, wurden beim Industriepartner Xella die Experimente anfänglich ausschließlich als Kleinversuche mit 17 Liter Treibvolumen durchgeführt. Die Porenbetonmischung ist eine Suspension aus den Partikeln der eingesetzten Feststoffkomponenten (Sand, Zement, Kalk, Sulfatträger) und Wasser. Wie in jeder Suspension unterliegen die Partikel den in einem solchen heterogenen Stoffgemisch vorherrschenden Kräften. Dies betrifft insbesondere den zusätzlich eingesetzten NAPOS-Füllstoff. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Feststoffkomponenten deutlich größeren Partikelgröße können verstärkt Sedimentationskräfte wirken (Bild 5).

Bild 5 Sedimentation NAPOS-Füller Partikelgröße 4 – 8 mm, Bodensatz im Porenbeton [Quelle: Xella]

Es wurden NAPOS-Füller mit Korndurchmessern bis zu 8 mm eingesetzt. Insbesondere die getesteten Füllstofftypen mit einer Kornfraktion größer zwei Millimeter sedimentierten stark. Das Porengefüge bleibt über die Treibhöhe dabei weitgehend konstant. Nur im unteren Bereich sammelt sich der im Vergleich zu den anderen Komponenten gröbere Zuschlag an. Die groben Partikel sinken aufgrund ihres Gewichtes unmittelbar nach dem Abgießen – also vor der eigentlichen Gasentwicklung und dem Treibprozess – auf den Boden des Versuchskörpers ab. Wie aus dem Patent DE 10 2010 013 667 A1 bekannt, können bauchemische Additive (Sedimentationshemmer) das Steggefüge aus feinteiligen Rohstoffkomponenten und Wasser in Porenbeton stabilisieren und einen Kollaps der Mischung verhindern. Gleichzeitig werden wie bei herkömmlichem Beton große Partikel vom Sedimentieren abgehalten. Um einer Sedimentationsneigung des NAPOS-Füllers entgegenzuwirken, wurden verschiedene Sedimentationshemmer getestet, wie beispielsweise modifizierter Harnstoff, hydrophobiertes nichtionisches Polymer, modifizierte Stärke und Polyethylenglykol. Durch die Verwendung von diesen Additiven kann das Sedimentationsverhalten des NAPOS-Füllers in Porenbeton verringert werden. Die Wirkung hängt dabei von der Art des jeweiligen Zusatzmittels sowie von dessen Einsatzmenge ab.

3.3 Versuchsergebnisse

Durch den Einsatz von NAPOS-Füller wird das Festigkeitsniveau des fertigen Produktes abgesenkt.

Die Art der Hydratation und die Trocknung des Füllers bei dessen Herstellung sind nicht maßgebend für das Festigkeitsniveau des fertigen Porenbetons. Je höher der Korndurchmesser des NAPOS-Füllers ist, desto stärker fällt der Festigkeitsverlust bei der Zugabe des Materials aus (Bild 6).

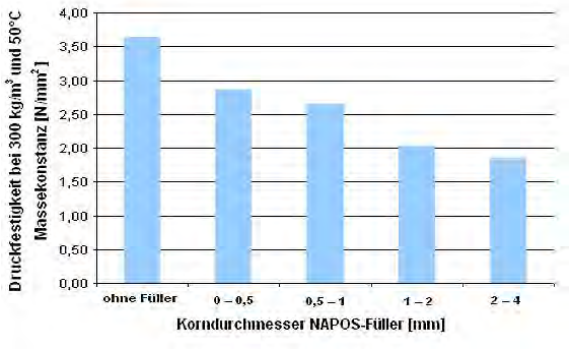


Bild 6 Druckfestigkeit von Porenbeton in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des NAPOS-Füllstoffs (40 M.-% bezogen auf die Gesamttrockenstoffe der Mischung) [Quelle: Xella]

Der Gehalt an 11 Å Tobermorit (festigkeitgebende Phase in Porenbeton) wird durch den Einsatz des nanoporösen Füllers geringer und der amorphe Anteil höher. Der Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit des Porenbetons wird abgesenkt. Gleichzeitig tritt eine Verschlechterung der hygrischen Eigenschaften, insbesondere des Adsorptionsfeuchtegehalts, ein. Das führt zu einem höheren Feuchtezuschlag Fm nach DIN EN 1745 und schlussendlich zu einem höheren Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit. Bei den abschließenden Werksversuchen wurden unterschiedliche NAPOS-Chargen verwendet. Das beste Druckfestigkeitsniveau kann mit der Kornfraktion 0–0,5 mm erreicht werden. Das Treibvolumen der im Großtechnikumsmischer gerührten Ansätze betrug zwischen 2,57 m³ und 5,4 m³ (Standardwerksform). Plansteine konnten damit hergestellt werden (Bild 7).

3.4 Fazit

Verfahrenstechnisch ist der »NAPOS-Ansatz« umsetzbar. Die Grenze liegt derzeit bei einer Zuschlagsmenge von 40 M.-% und der obere Korndurchmesser darf zwei Millimeter nicht überschreiten (→ Sedimentation). Insbesondere Korndurchmesser kleiner 0,5 mm bringen den größten Erfolg.

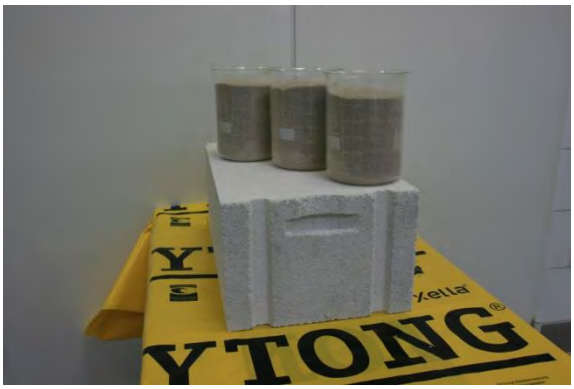


Bild 7 Planstein mit NAPOS [Quelle: Xella]

Für eine erfolgreiche Absenkung der Wärmeleitfähigkeit des Porenbetons über den NAPOS-Ansatz müssen insbesondere die hygrischen Eigenschaften des nanoporösen Füllstoffes verbessert werden.

4 Technikfolgenabschätzung

Hiermit wird die Entwicklung von NAPOS aus einer breiteren Perspektive analysiert und bewertet, um die übergeordneten Ziele nicht aus den Augen zu verlieren: Eine über den Lebenszyklus aus Herstellung, Nutzung und Recycling verbesserte Energieeffizienz und ein reduzierter Rohstoffverbrauch bei geringem Schadstoffgehalt.

4.1 Prozessketten und vergleichende Bewertung

Um abzuschätzen, inwieweit die Verwendung von nanoporösem Leichtzuschlag aus h-CSH den ökologischen Rucksack (hier: »graue Energie«) des Porenbetons verändert, wurde eine plausible Prozesskette aufgestellt. Alle durchgeführten Bilanzierungen zeigen, dass die über die Herstellung von h-CSH hinausgehenden Verfahrensschritte (vgl. Bild 4) kaum einen Einfluss (<1 %) auf die Energiebilanz haben. Basierend auf einer Rezeptur von 40 Massen-% nanoskaligem Feinzuschlag in NAPOS wird der Primärenergieverbrauch bei der Herstellung von NAPOS auf ca. 1437 MJ/m³ abgeschätzt. Der gegenüber einem Modell-Porenbeton der Rohdichteklasse 2 um 17 % höhere Wert resultiert auf dem höheren Energiebedarf für die Herstellung von h-CSH. Die CO_2-Emissionen sind bei der Herstellung von NAPOS mit 159 kg CO_2/m³ etwas erhöht. Die nicht offengelegten Herstellungskosten von Porenbeton wurden mit Hilfe plausibler Kalkulationskenngrößen aus dem Baubereich in Teilschritten durch Rückrechnung aus den Listenpreisen für P2 und P4 Po-

renbetone abgeschätzt. Hierzu wurden übliche Rabattsätze, die der Hersteller dem Händler gewährt, zugrunde gelegt, wie auch andere Kostenkomponenten (Verpackung, Lagerung und Transport) berücksichtigt. Insgesamt können Herstellungskosten für NAPOS (Basis: 40 Massen-% Feinzuschlag) ermittelt werden, die einen Aufschlag von 4 Euro/m³ für den betrachteten Porenbeton bedeuten.

4.2 Chancen und Potentiale von NAPOS-Materialien

Zur Beantwortung der Frage, wo und in welchem Umfang sich NAPOS bevorzugt einsetzen ließe, war vorab die Ausgangssituation für den konventionellen Porenbeton zu analysieren. Als Basis waren die derzeitigen Einsatzbereiche und deren Marktvolumen näher zu betrachten. Die fehlenden Marktdaten zu Außenwänden im Neubau wurden indirekt über Plausibilitätsbetrachtungen und andere zugänglichen Daten abgeschätzt und mit Marktrecherchen der Fa. Xella abgeglichen. Der gesamte Porenbetonmarkt in Deutschland beträgt derzeit jährlich
3–3,5 Mio. m³, wovon 1,9 Mio. m³/a in den Bau von Außenwänden gehen. Daran haben Neubauten von Ein-, Zweifamilien-, Doppel- und Reihenhäusern einen Anteil von 85 %. Dies ist auch das potentielle Anwendungsfeld für NAPOS. Im Rahmen des Projektes wurde ein Modellhaus betrachtet, dessen Außenwände aus herkömmlichem Porenbeton und im Vergleich dazu aus NAPOS bestehen, um dessen Nutzenergiebedarf zu vergleichen. Zugrunde gelegt wurde ein zweistöckiges Haus mit 146 m² Wohnfläche und einer Gebäudehüllfläche von 542 m³, das 36,5 cm-Porenbetonsteine (λ: 0,07 W/mK) für das Mauerwerk verwendet. Die Anforderungen der EnEV 2016 wurden eingehalten. Der Nutzwärmebedarf wurde auf 10200 kWh/a bestimmt. Auf den Anteil Außenwand aus Porenbeton mit Putz entfallen 29 %. Das bedeutet, dass der Nutzwärmebedarf zu einem größeren Teil von anderen Faktoren als den Außenwänden im Wohnbereich abhängt. Ersetzt man den normalen Porenbetonstein durch NAPOS, wirken sich mögliche Veränderungen nur auf diese Außenwände aus. Die Abschätzungen zeigen, dass sich ohne Optimierung auf der Basis erster Messergebnisse der Nutzwärmebedarf im Falle von NAPOS nur geringfügig auf 10300 kWh/a erhöht. Vor dem Hintergrund, dass es sich um ein absolut neuartiges Verfahren handelt, ist dieses Ergebnis sehr erfolgversprechend.
Im Projektzeitraum konnten Porenbeton-Grünkörper mit Treibporen realisiert werden, die bis zu 40 Massen-% Leichtzuschlag enthielten. Aktuell sind die Festigkeitswerte für Mauersteine aus NAPOS niedriger als von der Rohdichte her vergleichbare Porenbetonsteine. Dies weist darauf hin, dass weitere Optimierungen notwendig sind. Was die Wärmedämmung betrifft, sind bei einem Substitutionsgrad in dieser Größenordnung noch keine markanten Zugewinne zu erwarten. Eine homogene Einbindung von bis zu 80 Massen-% Leichtzuschläge ohne Entmischungseffekte und gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit konnte in der Laufzeit des Projektes noch nicht realisiert werden. In diesem Bereich steckt jedoch das eigentliche Potential von NAPOS für die Wärmedämmung und für die Druckfestigkeit. Parallel dazu sollte es Ziel sein, auf Treibporen beim Porenbeton zu verzichten. Ein weiterer Entwicklungsfortschritt ist denkbar, wenn das Bindemittel (Portlandzement-basiert) durch h-CSH-basierte Systeme ersetzt wird. Dies würde eine optimale Isochemie für Leichtzuschlag und Strukturmatrix bedeuten. Es existiert derzeit kein Wandsystem, das unter verschärften Energieeffizienzanforderungen in seinem gesamten Lebenszyklus nachhaltig ist. Ideal wäre eine System-Entwicklung, in der die Außenwand entweder aus funktionalen Komponenten eines Grundmaterials aufgebaut ist oder eine monolithische Bauweise erlaubt, die diese Anforderungen erfüllt. In dieser Vision würden die tragenden Mauersteine, die Wärmedämmung, die verwendeten Mörtel und gegebenenfalls auch Putze aus einem Basis-Stoff bestehen. Hier bieten Baustoffe aus CSH ein hohes Potential. Dabei werden Herstellungstechnologien benötigt, die in Zukunft in weit größerem Maße eine stoffliche Wiederverwendung von Materialien nach dem Rückbau erlauben. Insbesondere hier bietet sich die Verwendung von h-CSH-Bindern an, deren technologische Entwicklung und Nutzung gerade beginnt. Vor diesem Hintergrund stellt NAPOS ein Einstiegsprojekt auf dem Weg zur Realisierung dieser Vision dar.

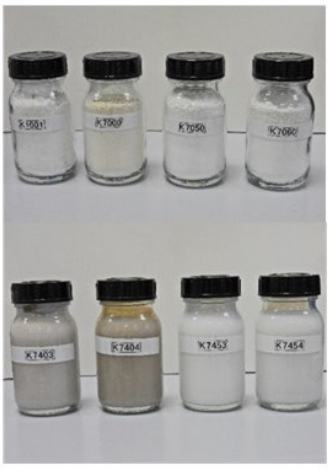
Literaturverzeichnis

- DIN EN 1745:2012-07 Mauerwerk und Mauerwerksprodukte – Verfahren zur Bestimmung von wärmeschutztechnischen Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 1745:2012

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N13298 bis 13N13300 gefördert.

PureBau

HighTech MatBau



KRONOS

KEIM

FCN BETONELEMENTE

ERLUS

Dyckerhoff

Untersuchung von Werkstoffsystemen für photokatalytisch hocheffiziente Baustoffe

Entwicklung von Demonstratoren für Betonsteine, Sichtbeton, Fassadenfarbe und Dachziegel und einem Messverfahren zur Feststellung der Funktionstüchtigkeit der Materialien in der Applikation

Thomas Koch, Horst Purwin; KRONOS INTERNATIONAL, Inc.

Kurzfassung: Luftverschmutzung in urbanen Ballungszentren ist ein Kernproblem der Menschen des 21. Jahrhunderts, für das es im Augenblick innerhalb der nächsten 40 Jahre keine schnell greifende, kurzfristige Lösungsmöglichkeit gibt [1]. Selbst durch Fahr- und Produktionsverbote erreicht man Minderungen der durchschnittlichen jährlichen Belastung für die Einwohner um lediglich etwa 3 %–10 %. Titandioxid, ein ungiftiges Material, das als Weißpigment breite Anwendung findet, ist ein photoempfindlicher Halbleiter, der mit Sonnenlicht freie Elektronen produzieren kann. Diese Elektronen können an der Materialoberfläche adsorbierte Moleküle zu Radikalen umwandeln, welche dann mit anderen adsorbierten Molekülen chemisch reagieren können. Schlussendlich kommt es zum Abbau der an der Baustoffoberfläche adsorbierten Moleküle [2], [3]. Titandioxid kann dazu hergenommen werden, um photokatalytisch aktive Baumaterialien wie zum Beispiel Betonsteine, Sichtbeton, Fassadenfarbe und Dachziegel herzustellen, die in der Lage sind, an der Oberfläche der Baumaterialien Moleküle abzubauen. Dies führt mit der Hilfe von Sonnenlicht zu selbstreinigenden Oberflächen, die über die Nachdiffusion und Adsorption von Gasmolekülen aus der Umgebungsluft auch die Umgebungsluft von Molekülen befreien können [4]. Über diesen Effekt kann man die Luftverschmutzung in urbanen Ballungsräumen verringern, wenn man genügend Bautenflächen mit photokatalytischen Eigenschaften ausrüstet. Bisher konnte die hohe Aktivität des reinen Titandioxids noch nicht in die Applikation übertragen werden. Im Projekt PureBau wurden deshalb Demonstratoren für hochphotoaktive Baumaterialien generiert. Gleichzeitig wurde ein Demonstrator für ein kostengünstiges, handliches und zuverlässiges Messverfahren entwickelt, um die photokatalytische Effizienz des Baumaterials zu charakterisieren. Mit den im Projekt generierten Materialien, deren Aktivität gegenüber dem Projektbeginn zum Teil um bis zu einem Faktor 16 gesteigert werden konnte, würde flächig angewendet die molekulare Schadstoffbelastung der Luft in urbanen Gebieten um bis zu 3–5 % reduziert werden.

Stichworte: Photokatalyse, Titandioxid, Luftreinigung, Selbstreinigung, Fassade, Dach, Beton, Sichtbeton, Silikatfarbe, Fassadenfarbe Betonpflasterstein

1 Einleitung

Eines der zentralen urbanen Probleme weltweit ist die Luftverschmutzung in den Ballungsräumen. In den letzten 50 Jahren wurde mit der Festlegung von Emissionsgrenzen und der Nutzung von Filteranlagen diesbezüglich schon viel erreicht. Leider wurde dadurch die Umweltbelastung nur begrenzt, nicht vermieden. An vielen Stellen ist man mit solchen Maßnahmen schon am wirtschaftlich oder technisch machbaren Limit angekommen. Aktuell setzt sich zum Beispiel in Mitteleuropa die Luftverunreinigung in den Städten wie folgt zusammen: 30 % Fahrzeugverkehr, 30 % Haushalte und 40 % Industrie und Energiegewinnung [1]. Dabei werden heute für alle drei Bereiche zu einem sehr großen Teil fossile Energieträger als Energiequelle eingesetzt. Wenn man die Luftverschmutzung verringern möchte, muss man aktuell zu Fahrverboten oder

Fertigungsverboten greifen, da man beispielsweise im Winter niemandem einfach die Heizung abdrehen kann. Langfristig kann diese Problematik nur durch einen Wechsel von fossilen Energieträgern auf andere Energieträger wie Wasserstoff, Solarenergie und Windkraft oder andere Alternativen gelöst werden. Bis solche Ansätze, wie zum Beispiel eine verstärkte Elektromobilität, voll greifen, können aber gut und gerne noch 20 bis 40 Jahre ins Land gehen.

Für diese Zeit gibt es außer den Verboten mit all ihren wirtschaftlichen Nachteilen keine Lösungsansätze, die den Kommunen helfen. Städtische Räume besitzen durch die Bebauung eine sehr große Oberfläche, die hauptsächlich durch Baustoffe (Beton, Fassadenfarbe, Dachziegel, Glas usw.) gebildet wird. Fast alle Baustoffe können potenziell durch die Ausrüstung mit Titandioxid (TiO_2) mit einer photokatalytischen Aktivität versehen werden [2], [3], [4]. Diese verspricht enorme Vorteile:

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

Wie sich der Einsatz photokatalytischer Materialien auswirkt, kann anhand einer Simulation für eine typische Innenstadtstraße veranschaulicht werden.

Bild 1 Beispielstraße für urbane Straßen – ein Blick über die Altstadt von Nürnberg vom Spittlertorturm (Copyright: Manfred Braun, Nürnberg) aus: Fassaden, Dächer, Straße, Fußweg: Abbau von NO, NO_2 und O_3 mit einer mittleren Depositionsrate 0,4 cm/s ⇒ ca. 30 % Schadgase pro Jahr - weniger ⇔ 110 Tage absolutes Heiz- und Fahrverbot (fossile Brennstoffe).

In Bild 1 sieht man das Foto einer Straße in einer Großstadt (Nürnberg). Würde man nun diese Straße flächig mit photokatalytischen Materialien ausstatten, d. h. bei Erneuerungsarbeiten photokatalytisch aktivierte Betonpflastersteine, Fassadenfarben und Dachziegel verwenden, so könnte man bei einer Depositionsrate der Materialien für Stickoxide (NO_X) von 0,4 cm/s im Jahresmittel in etwa 30 % der NO_X-Moleküle in der Luft in der Straße abbauen.

In Bezug auf den NO_X-Abbau käme dies im Mittel einer kompletten Einstellung des Straßenverkehrs oder einer Abschaltung der Heizungen (inklusive der Warmwasserversorgung) in den Gebäuden gleich – oder als hätte man 110 Tage im Jahr sowohl den Straßenverkehr eingestellt als auch die Heizungen ausgeschaltet.

2 Projektbeschreibung

Die Selbstreinigung der Oberflächen und die photokatalytische Reinigung der Luft wurden 2013 im Labor mit hoher Effizienz erzielt. Im Einsatz am Freilandobjekt jedoch konnten diese Laborergebnisse zu Projektbeginn nicht erreicht werden. Das Verständnis für die Langzeitwirkung und die Wechselwirkungen der unterschiedlichsten Material- und Umwelteinflüsse auf die photokatalytische Oberfläche war nicht ausreichend, um die gemessenen Unterschiede zu erklären und die Schaffung neuer optimierter Materialien gezielt voranzutreiben.
Diese Problematik wollte das Verbundprojekt - »PureBau®«, bestehend aus elf Partnern (siehe Bild 2) nachhaltig lösen. Drei wesentliche Forschungsschritte waren hierzu erforderlich:

- Erforschung der Wechselwirkungen zwischen dem Photokatalysator und seiner Umgebung (Umwelteinflüsse und Einbettungssysteme)
- Evaluierung der Forschungsergebnisse durch mehrere innovative Werkstoffdemonstratoren
- Schaffung der Grundlagen für ein robustes, als Standard geeignetes Messsystem für die photokatalytische Aktivität einer Werkstoffoberfläche, um Messungen im Labor und an Objekten im Freiland eindeutig und vergleichbar zu machen.

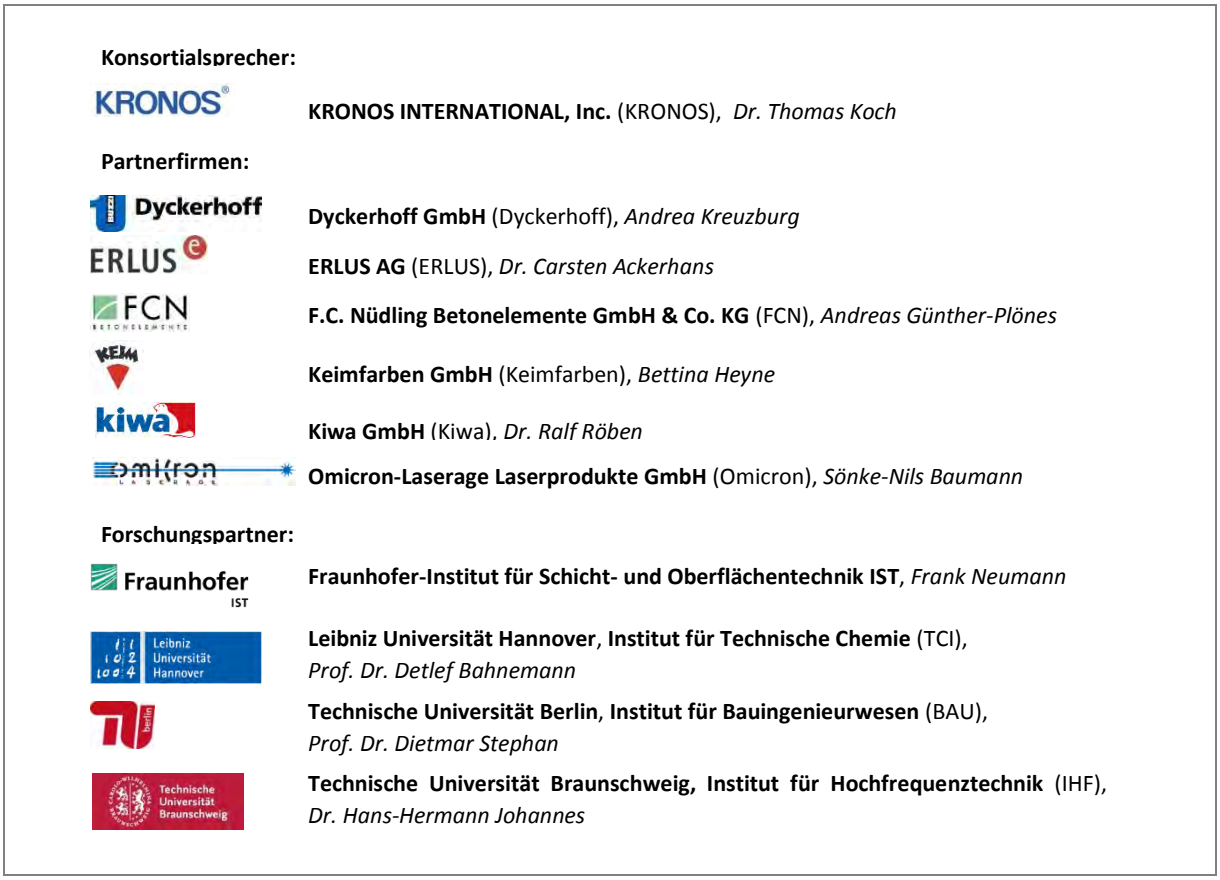


Bild 2 Zusammensetzung des Konsortiums

Das Projektkonsortium hat diese Schritte im Rahmen des dreijährigen Projekts anhand mehrerer Materialien und Baustoffe durchgeführt. Im Einzelnen sind dies: Spezialzement, Betonwaren (Pflastersteine), Fassadenfarben, Dachziegel und verschiedene TiO_2-Granulate/Slurries/Pulver/Premixe. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette der Werkstoffproduktion einbezogen, von den wissenschaftlichen Grundlagen über Rohstoffe bis hin zur Herstellung von Werkstoffen und industrierelevanten Materialien.

Ausgehend von Referenzmaterialien wurde iterativ (siehe Bild 3) in mehreren Zyklen an den Wechselwirkungen geforscht und auf Basis dieser Forschungsergebnisse die Materialentwicklung optimiert und die Materialeigenschaften in der Applikation überprüft. Diese Schleife wurde im Projekt mehrfach durchlaufen. Für die Entwicklung des Messverfahrens wurde die gleiche iterative Strategie wie für die Baumaterialien angewendet.

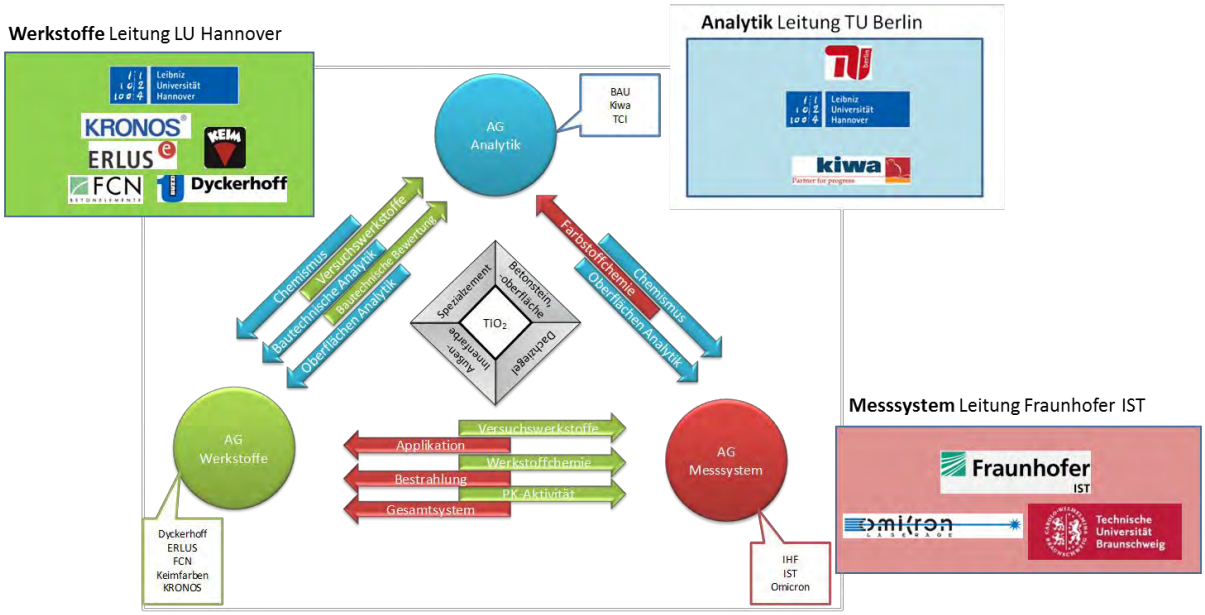


Bild 3 Bild 3: Zusammenarbeit und Kompetenzen der einzelnen Partner im Projekt: Iterativer Prozess: Referenz ⇒ Eigenschaften bestimmen ⇒ Untersuchung der WECHSELWIRKUNG ⇒ Demonstrator ⇒ Eigenschaften Bestimmen ⇒ neue Referenz; hohe Quervernetzung zwischen den Arbeitsbereichen

Bild 4 Im Projekt als Freiland-Demonstrator erstellte Hausfassade mit Pultvordach.

Tabelle 1 Die Aktivitäten der Baumaterialien wurden im Projekt um bis zu einem Faktor 16 verbessert.

Material	NO_x-Abbau Referenz [µmol/5h]	NO_x-Abbau Demonstrator [µmol/5h]	Optimierungsfaktor
Dachziegel	0,094	1,24	13,2
Fassadenfarbe	0,187	2,70	14,4
Sichtbetonelement	1,125	18,80	16,0
Betonpflastersteine	0,644	7,02	10,9

3 Ergebnisse

Aus diesem Ansatz sind nun Demonstratoren hocheffektiver, langlebiger Photokatalysewerkstoffe mit Depositionsraten von 1 cm/s und darüber hinaus entstanden, die eingesetzt zum Teil mehr als das Dreifache der im Beispiel in Bild 1 beschriebenen Wirkung aufweisen. Wie die Tabelle in Bild 5 zeigt, konnte die Wirkungsweise der Materialien im Laufe des Projektes um bis zu einen Faktor 16 gesteigert werden. Damit sind jetzt, wie das in Bild 4 dargestellte Foto des Freilanddemonstrators zeigt, hocheffiziente und hochqualitative Baustoffe möglich und die Photokatalyse könnte bei flächigem Einsatz das Leben der Menschen in urbanen Räumen deutlich verbessern, ohne sie einschränken zu müssen. Das Projekt hat somit eine herausragende Bedeutung für die städtischen Lebensräume weltweit und für die deutsche Wirtschaft gewonnen und wird bei Einsatz der entwickelten Materialien einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Lebensbedingungen für Menschen in Ballungsräumen leisten.

Literaturverzeichnis

[1] George Thurston, Literature Review of Air Pollution Related Health Endpoints and Concentration-Response Functions for Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide: Results and Recommendations Surface, Industrial Economics Incorporated, Cambridge (2015)

[2] Ulrike Diebold, The Surface Science of Titanium Dioxide, Surface Science Reports, volume 48, issues 5-8 (2003), pages 53-229

[3] Akira Fujishima, Xintong Zhang, Donald A. Tryk, TiO_2 Photocatalysis and Related Surface Phenomena, Surface Science Reports, - volume 63, issue 12 (2008), 515-582

[4] Jun Chen, Chi-Sun Poon, Photocatalytic Construction and Building Materials: From Fundamentals to Applications, Building an Environment, volume 44, issue 9 (2009), pages 1899-1906

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N13344 bis 13N13354 gefördert.

R-Beton

HighTech MatBau

R-Beton – es geht viel mehr!

Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt R-Beton

Julia Scheidt, Wolfgang Breit, Technische Universität Kaiserslautern, Raymund Böing, HeidelbergCement AG

Kurzfassung: Innerhalb des Verbundforschungsprojekts »R-BETON – RESSOURCEN SCHONENDER BETON – WERKSTOFF DER NÄCHSTEN GENERATION« sollen Wege gefunden werden, bestehende Regelungshemmnisse nachhaltig zu beseitigen, um zukünftig mineralische Bauabfälle in der Betonherstellung wiederzuverwenden.
Im Ergebnis sollen praxisgerechtere Anwendungsregeln geschaffen werden, die sowohl für die Altbaustoffrecyclingunternehmen als Produzenten der Gesteinskörnungen als auch für die Transportbetonindustrie gegenüber dem Status Quo deutliche Fortschritte ermöglichen. Es werden dabei sowohl grundlegende Fragen der Betonzusammensetzung angegangen, als auch neue Betonzusatzmittel erforscht. Dabei spielen die Kontrolle der Eigenschaften des Ausgangsmaterials und des Wasserzementwerts eine große Rolle. Nicht nur der Kernpunkt der werkstofftechnologischen Fragestellungen wird betrachtet, sondern das Thema wird ganzheitlich von allen Seiten beleuchtet. Unterteilt ist das Gesamtprojekt dabei thematisch in sieben Teilvorhaben, die jeweils verantwortlich von einem der sieben Projektpartner bearbeitet werden. Zu den Forschungspartnern zählen neben der Technischen Universität Kaiserslautern und dem Konsortiumsführer HeidelbergCement AG auch die BASF Construction Polymers GmbH, der Baustoffaufbereiter Scherer und Kohl GmbH & Co. KG, die VDZ gGmbH, das ifeu Institut Heidelberg GmbH sowie die RWTH Aachen.
Erste Ergebnisse zeigen, dass gegenüber den bestehenden Regelwerken höhere Anteile rezyklierter Gesteinskörnung möglich sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Änderung der bestehenden Regelwerke eine praxisgerechtere Anwendung ermöglichen wird.

Stichworte: Rezyklierte Gesteinskörnungen, R-Beton, Beton, Gesteinskörnung, Regelwerke

1 Projektziele

Innerhalb des Verbundforschungsvorhabens »R-Beton – Ressourcen schonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation« sollen Wege gefunden werden, bestehende Regelwerkshemmnisse nachhaltig zu beseitigen, um zukünftig mineralische Bauabfälle in der Betonherstellung in nennenswertem Ausmaß wiederzuverwenden. Das Projektkonsortium und die Gestaltung der Projektinhalte wurden dabei so zusammengesetzt, dass alle wesentlichen Aspekte aufgegriffen werden, die einer breiten praktischen Anwendung des Werkstoffs R-Beton gegenwärtig entgegen stehen. Im Ergebnis sollen praxisgerechte Anwendungsregelungen geschaffen werden, die sowohl für die Recyclingunternehmen als Produzenten der rezyklierten Gesteinskörnung als auch für die Transportbetonindustrie gegenüber dem Status Quo deutliche Fortschritte ermöglichen.
Bearbeitet werden die Gesamtziele in insgesamt sieben Teilvorhaben, die jeweils verantwortlich von einem der sieben Projektpartner bearbeitet werden. Zu den Projektpartnern zählen neben der Technischen Universität Kaiserslautern die HeidelbergCement AG als Konsortiumsführer, das ifeu Institut Heidelberg GmbH, der Baustoffaufbereiter Scherer und Kohl GmbH & Co. KG, die BASF Construction Solutions GmbH, die VDZ gGmbH sowie die RWTH Aachen.
Die Ziele und Inhalte der einzelnen Teilvorhaben und die verantwortlichen Partner können [1] entnommen werden.
Das Forschungsvorhaben startete zum 1. November 2014 und wird am 30. April 2018 enden. Insgesamt stand ein Finanzvolumen von rund 2,7 Mio. Euro zur Bearbeitung zur Verfügung.

2 Status Quo der Regelwerke

Die Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ist derzeit über die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton »Beton nach DIN EN 2016-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620« [2] geregelt. Das Regelwerk basiert bis heute im Wesentlichen auf den Erkenntnissen des BMBF-Projekts »Baustoffkreislauf im Massivbau« [3] und somit auf dem Stand der Technik der 1990er Jahre. Die umfangreichen Fortschritte in der Betontechnologie und auf dem Gebiet der Betonzusatzmittel sowie die gemachten Erfahrungen beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in der Praxis finden noch keine Berücksichtigung. Ein detaillierter Überblick über den Status Quo der Regelwerke gibt [4].

Für die Betonherstellung sind in Deutschland zwei Typen grober rezyklierter Gesteinskörnung zugelassen. Typ 1 und 2 unterscheiden sich dabei im Wesentlichen durch den höchstzulässigen Anteil an Mauerwerksbruch. So darf rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 (Bild 1) maximal 10 M.-% Mauerwerksplitt enthalten, Typ 2 (siehe Bild 2) hingegen bis zu 30 M.-%.

Bild 1 Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 2/16 mm aus 90 M.-% Betonsplitt und 10 M.-% Mauerwerksplitt

Bild 2 Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2 2/16 mm aus 70 M.-% Betonsplitt und 30 M.-% Mauerwerksplitt

3 Projektschwerpunkt Betontechnologie

Im Forschungsprojekt R-Beton wurden und werden sowohl im Labor wie in Praxistests Konzepte entwickelt, die es möglich machen sollen, die besonderen Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung zu handhaben und zielsicher Betone für die Praxis herzustellen. Die entwickelten Konzepte müssen dabei stets ökologischen und ökonomischen Kriterien Stand halten und mit den Bemessungskonzepten des Eurocode 2 vereinbar sein.

Die Technische Universität Kaiserslautern bildet dabei die Schnittstelle zwischen mehreren Projektpartnern und den jeweiligen Arbeitspaketen.

Zunächst wurden, aufbauend auf die Stoffstromanalyse des Projektpartners ifeu Institut Heidelberg GmbH, die Anforderungen der Betontechnologie an die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen und der damit verbundenen Aufbereitungstechnik fokussiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen u. a., dass es für Gesteinskörnung >2 mm nicht notwendig ist, den zusätzlichen Verfahrensschritt einer Nassaufbereitung durchzuführen – ein wichtiger Aspekt im Rahmen der ökologischen und ökonomischen Betrachtung der Aufbereitung.

Die Gesteinskörnungsproduktion des Projektpartners Scherer und Kohl GmbH & Co. KG wurde über den gesamten Projektverlauf analysiert, um die Streubreite der Eigenschaften festzustellen. Die Eigenschaften können von Charge zu Charge sehr stark streuen und bedingen für den Betonhersteller einen erhöhten Prüfaufwand.

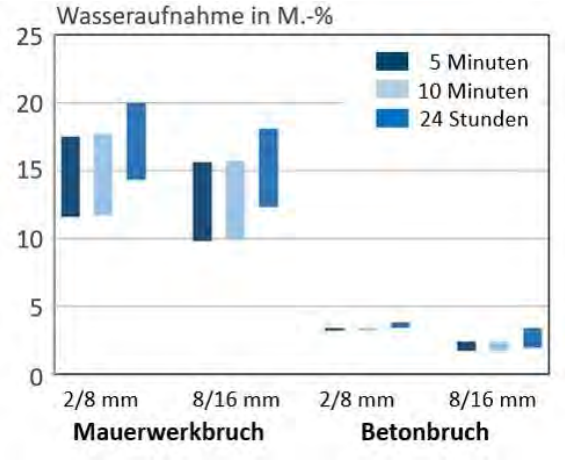


Bild 3 Streubreite Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6

Exemplarisch ist in Bild 3 die Streubreite der Wasseraufnahme über alle sortenreinen Lieferchargen dargestellt. Diese Materialien wurden im Labor in

definierter stofflicher Zusammensetzung zu Typ 1 und Typ 2 zusammen gemischt. Mithilfe von speziell angepassten Betonzusatzmitteln, die vom Projektpartner BASF Construction Solutions GmbH im entsprechenden Teilvorhaben erarbeitet wurden, konnten die angestrebten Frischbetoneigenschaften der Betone, angepasst an die Erfordernisse der Transportbetonanwendung, zielsicher erreicht werden. Wie die Wasseraufnahme und der Einfluss feuchter Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften möglichst praxisgerecht Berücksichtigung finden kann, wird im Projekt sowohl im Labor als auch beim Einsatz der im Labor erforschten Betone in der Transportbetonanwendung untersucht. Ziel ist ein Leitfaden für die Handhabung rezyklierter Gesteinskörnung in der Praxis.
Die Einordung der erarbeiteten Betonzusammensetzungen in die bestehenden Bemessungskonzepte des Eurocode 2 muss ohne Einschränkungen möglich sein, weshalb dieser Aspekt ebenfalls ein Bestandteil der Projektarbeiten ist. Die bislang vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass diesbezüglich, auch bei vollständigem Ersatz der groben Gesteinskörnung > 2 mm, keine Einschränkungen zu erwarten sind. Eine Zusammenfassung der betontechnologischen Zwischenergebnisse ist in [5] und [6] dargestellt.

4 Projektschwerpunkt Umweltverträglichkeit

Im Verbundvorhaben untersuchte und bewertete das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen die Umwelteinflüsse von rezyklierter Gesteinskörnung. Hierzu wurde eine Bandbreite von rezyklierten Gesteinskörnungen charakterisiert und mit unterschiedlichen Prüfverfahren auf ihr Auslaugverhalten untersucht.
Ziel war unter anderem auch, einen Schnelltest mit Korrelation zu den Auslaugraten des Langzeitstandtests DSLT zu finden, da der DSLT die Freisetzung umweltrelevanter Stoffe zwar realitätsnah abbildet, jedoch aufgrund seiner langen Dauer für die Qualitätsüberwachung problematisch ist.
Die Ergebnisse zeigen, dass die Auslaugraten der R-Betone sehr gering sind und sich kaum von denen der Referenzbetone unterscheiden. Der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Beton erhöht, wie in [7] dargelegt, die Auslaugung von Schwermetallen und Spurenelementen sowie von Chloriden und Sulfaten aus Beton nicht signifikant. Die Versuche zum Auslaugverhalten der ungebundenen rezyklierten Gesteinskörnungen führten zu der Erkenntnis, dass keine Korrelation zwischen den durchgeführten Schnellversuchen (Schüttelversuche mit verschiedenen Wasser/Feststoff-Verhältnissen, pHstat-Versuche mit verschiedenen pH-Werten, Säulenversuch nach DIN 19528 sowie pHstat-Trogversuch) und dem Langzeitstandtest DSLT festzustellen ist. Außerdem wurde festgehalten, dass die Auslaugung des R-Betons im Wesentlichen durch das Bindemittel bestimmt wird. Die Ergebnisse dieses Teilvorhabens sind in [7] ausführlicher erläutert.

5 Projektschwerpunkt AKR

Die VDZ gGmbH führte im Rahmen des Forschungsvorhabens Versuche durch, die das Ziel hatten, die Einstufung rezyklierter Gesteinskörnungen in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (mit den entsprechenden vorbeugenden Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton) zu überprüfen. Das Versuchsprogramm sowie die Ergebnisse sind in [8] zusammengefasst.
Erste Ergebnisse zeigen, dass bei rezyklierten Gesteinskörnungen die aktuelle Einstufung in E III-S mit den dann greifenden vorbeugenden Maßnahmen nicht in allen Fällen ausreichend sein können. Aufgrund der Ergebnisse wurde in [8] die Empfehlung ausgesprochen, die rezyklierte Gesteinskörnung bei unbekannter Herkunft, wie in den Regelwerken vor 2007, in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-O einzustufen. Das abschließende Ergebnis bezüglich der Einstufung in die Alkalieempfindlichkeitsklasse wird zum Projektende erwartet.

6 Projektschwerpunkt Praxistransfer

Um die Projektergebnisse aus dem Labor auf ihre Praxistauglichkeit hin zu prüfen und Erfahrungen im Umgang mit dem Werkstoff R-Beton zu gewinnen, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens umfangreiche Praxistests vorgesehen.
In den Laboren des Projektpartners HeidelbergCement AG wurden zunächst Praxisgemische rezyklierter Gesteinskörnungen der Lieferkörnung 2/16 der Typen 1 und 2 über mehrere Chargen auf ihre Eigenschaften untersucht und in vergleichbaren Betonzusammensetzungen aus der Praxis eingesetzt [6].
Alle gelieferten Gesteinskörnungen erfüllten die Anforderungen zur Umweltunbedenklichkeit gemäß DIN 4226-101 [9]. Mit diesen verschiedenen Chargen wurden Betonversuche durchgeführt, bei denen die Gesteinskörnung > 2 mm vollständig durch die rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 bzw. Typ 2 ersetzt wurde. Das Ansteifverhalten der Betone war, bei leicht erhöhter Fließmitteldosierung, ähn-

lich dem der Referenzmischungen mit natürlicher Gesteinskörnung [6]. Auch die Druckfestigkeiten, Spaltzugfestigkeiten und E-Moduli wiesen eine ähnliche Größenordnung zum Referenzbeton auf und konnten die Anforderungen der jeweils angestrebten Druckfestigkeitsklasse erfüllen. Tendenziell waren bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung die Spaltzugfestigkeiten und E-Moduli im jungen Alter niedriger als die Vergleichsbetone. Die hergestellten Luftporenbetone konnten die Anforderungen an einen Beton mit hohem Frostwiderstand gemäß BAW-Merkblatt [10] im CIF-Verfahren durchweg erfüllen und wiesen keine wesentlichen Unterschiede zu den Vergleichsbetonen auf (siehe Bild 4 bzw. [6]).

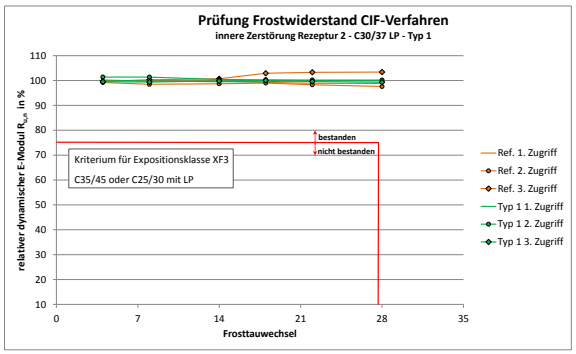


Bild 4 Ergebnisse der CIF-Prüfungen nach [10]

Zudem wurden Versuche zum Karbonatisierungswiderstand mit einer Schnellkarbonatisierung bei 3 Vol.-% CO_2 durchgeführt und ausgewertet. Bei den Versuchsergebnissen zeigte sich ebenfalls kein wesentlicher Unterschied zwischen den geprüften Referenzbetonen und den Betonen mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung >2 mm.

Als Praxistest innerhalb des Verbundforschungsvorhabens »R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation« wurde ein Großdemonstrator errichtet, um die labortechnisch entwickelten Betonzusammensetzungen auf Praxistauglichkeit zu prüfen und Erfahrungen im Umgang mit R-Beton im Transportbetonwerk sowie auf der Baustelle zu gewinnen.

Die Rohbauarbeiten konnten im September 2017 nach zweimonatiger Bauzeit erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Bild 5).

Bild 5 Fertiggestellter Rohbau mit Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen – Großdemonstrator »Small House III«

Das deutschlandweit erste Gebäude, bei dem in ausnahmslos allen Bauteilen Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung zum Einsatz kam, steht im Small House Village der Technischen Universität Kaiserslautern. Errichtet wurde das Gebäude in Zusammenarbeit zwischen den Fachgebieten Werkstoffe im Bauwesen (verantwortlich für die Planung und Ausführung der Betonbauarbeiten) und Bauphysik/ Energetische Gebäudeoptimierung (verantwortlich für die Konzeption und Gesamtplanung) mit finanzieller Unterstützung des Bauforums Rheinland-Pfalz.

Alle Bauteile des Demonstrators, von den Streifenfundamenten über die Bodenplatte, die Wände und den wandartigen Träger bis hin zu den Halbfertigteilen plus Ortbetonergänzung, wurden unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt. In allen vertikalen Bauteilen wurde die grobe Gesteinskörnung >2 mm vollständig durch rezyklierte Gesteinskörnung der Typen 1 und 2 ersetzt, in den Decken wurden, entsprechend der DAfStb-Richtlinie für »Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung«, 35 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 2/16 mm ersetzt (Bild 6).

Bild 6 Elementdecken aus R-Beton
(Bild: HeidelbergCement AG/Lossen Foto GmbH)

Variiert wurden neben der Gesteinskörnung außerdem die Einbaukonsistenz der Betonzusammensetzungen von Konsistenzklasse F4 bis F6, die Betonfestigkeitsklasse von C 30/37 bis C 35/45 und das Einbauverfahren von Kübeleinbau zu Einbau mit der Betonpumpe. Insgesamt wurden im Demonstrator 85 m³ R-Beton eingesetzt.

Begleitet wurden die neun Betonagen von einem umfangreichen **Prüfprogramm** im Labor und auf der Baustelle, das gemeinsam von den Laboren der HeidelbergCement AG, der TRAPOBET Transportbeton GmbH Kaiserslautern KG und der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt wurde. Erste Ergebnisse können [6] entnommen werden.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Begleitprüfungen im Labor und auf der Baustelle.

Mit freundlicher Unterstützung von WiTraBau konnte der gesamte Baufortschritt durch ein Kamerateam begleitet und festgehalten werden.

Bild 7 Frischbetonprüfungen auf der Baustelle

Bild 8 Probekörperherstellung

Bild 9 Verbundpartner R-Beton

Literaturverzeichnis

[1] Heidelberg Cement AG (Hg.): R-Beton [Homepage], URL: http://www.r-beton.de, (Stand 21.11.2017)

[2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie »Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620«, Beuth, Berlin, 2010-09

[3] IWB Universität Stuttgart (Hg.): BiM-online [Homepage] Baustoffkreislauf im Massivbau, http://www.b-i-m.de, (Stand 21.11.2017)

[4] Scheidt, J., Breit, W.: »Status Quo beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung« in: beton 68. Jahrgang (2018), (vorab als Sonderdruck)

[5] Scheidt, J., Breit, W.: R-Beton: Neue Konzepte werden ihn etablieren, in: beton 67. Jahrgang (2017), Nr. 9, S. 327-328

[6] Scheidt, J., Breit, W., Böing, R.: BMBF High TechMatBau Vorhaben »R-Beton« – erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung imGroßdemonstrator (»Small House III« an der TU Kaiserslautern), HeidelbergCement Engineering und Innovation NEWSLETTER-TECHNIK, Dezember 2017, URL: http://www.heidelbergcement.de/de/tecletter

[7] Vollpracht, A.: Umweltrelevante Merkmale – in der Regel kein Problem, in: beton 67. Jahrgang (2017), Nr. 9, S. 328-331

[8] Borchers, I., Müller, C., Seidel, M.: Einstufung nach AKR-Richtlinie – ein Hemmnis?, in: beton 67. Jahrgang (2017), Nr. 9, S. 331-332

[9] DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

[10] BAW-MFB Merkblatt »Frostprüfung von Beton« (MFB), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2012

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N13119 bis 13N13125 gefördert.

Schwelle 2020

HighTech MatBau

Biblock-Bahnschwellen aus Kunststoff-Rezyklaten

Gerhard Linde, Dieter Kästingschäfer, G12 Freiform GmbH, Reinhard Lorenz, Georg Utz GmbH, Jörg Frenzel, Hyperion Verwaltung GmbH, Gudrun Gräbe, Michael Dieterle, Andreas Stolzenberg, Fraunhofer ICT

Kurzfassung: Das Projekt Schwelle2020 zielt auf die Herstellung einer zweigeteilten Bahnschwelle aus Kunststoffrezyklaten für den Einsatz als Streckenschwelle in Bahnnetzen. Im Rahmen der Projektarbeiten wurde anhand der gemessenen mechanischen Eigenschaften und der simulierten Festigkeiten im Schwellenmodell das Material ausgewählt. Beim Design der Schwellenblöcke wurde neben der geforderten Festigkeit die Machbarkeit der Fertigung im Spritzgussverfahren berücksichtigt. Anschließend wurde das Spritzgusswerkzeug gefertigt und getestet. Die dabei hergestellten Demonstratoren wurden ersten orientierenden Festigkeitsprüfungen unterzogen. Eine Lebenszykluskostenanalyse wird derzeit erstellt und soll die Gesamtkosten der Schwelle über die gesamte Lebensdauer vergleichend mit der Betonmonoblockschwelle bewerten.

Stichworte: Gleisschwelle, Biblockschwelle, Spritzguss, FEM-Simulationen, Moldflow-Berechnungen, Lebenszykluskosten, DURCRET

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das Streckennetz der Bahn in Deutschland umfasst ca. 60.000 km, wovon etwa 2.000 km auf die Hochgeschwindigkeitsstrecken >160 km/h entfallen [1]. Traditionell verwendete Werkstoffe für Gleisschwellen sind Beton, Holz und Stahl mit einer Verlegedichte von 1.400-1.600 Schwellen pro Kilometer. Die begrenzte Lebensdauer der Schwellen bedingt einen nicht unerheblichen jährlichen Auswechselbedarf. In jüngerer Zeit werden auf dem Markt vermehrt Neuentwicklungen aus Kunststoffen angeboten. Dabei liegen die Vorteile des Materials Kunststoff prinzipiell in einer langen Lebensdauer und einer hohen Resistenz gegen Frost und Betriebsflüssigkeiten, aber auch – im Vergleich mit Holz – gegen Termitenbefall. Nachteilig dagegen kann sich, sofern in der Konzeption nicht berücksichtigt, die größere Längenänderung aufgrund der jahreszeitbedingten Temperaturschwankungen auswirken, was dazu geführt hat, dass seit kurzem im Zulassungsverfahren die Längenkonstanz von Kunststoffschwellen nachgewiesen werden muss.
In Deutschland wird bisher hauptsächlich die Bauform der Stabschwelle verwendet. Darüber hinaus gibt es auch sogenannte Y-Schwellen und Biblockschwellen. Frankreich hingegen setzt traditionell auch auf Biblockschwellen. Die Zweiblockschwelle zeichnet sich dabei grundsätzlich durch einen geringeren Materialbedarf und – durch geringere Refelexionsflächen – die geringste Lärmentwicklung im Vergleich der 3 Schwellenformen aus [2].

1.2 Motivation und Zielstellung

Im Projekt Schwelle2020 werden die Vorteile des Materials Kunststoff mit den Vorteilen der zweigeteilten Bauform kombiniert, wobei die Vorteile durch die spezielle patentierte DURCRET-Form [3, 4] noch erhöht werden:

- Die zweiteilige Bauform mit großem Auflagerbereich und das Material sorgen für einen erhöhten Querverschiebe- und Schienendurchschubwiderstand und somit für eine verbesserte Lagestabilität und eine Schonung des Schwellen- und Gleiskörpers.
- Material und Bauform bewirken eine verringerte Schallabstrahlung, d. h. eine Schalldämmung im Vergleich zu Mono-Betonschwellen [2].
- Durch das spezielle Design kann der Verlegeabstand erhöht werden wodurch Material- und Verlegeaufwand verringert werden. Die Verwendung von Kunststoffrezyklaten erhöht zusätzlich die Ressourceneffizienz.

Prinzipiell kann die Schwelle2020 überall eingesetzt werden. Aktuell wird zunächst der Einsatz auf der Strecke anvisiert.

2 Projektarbeiten

2.1 Materialentwicklung, Schwellendesign und Festigkeitsberechnungen

Als Basis für die Materialentwicklung und Compoundierung wurden aufbereitete, hochwertige und sortenreine Kunststoffe aus dem Post-Consumer-Bereich gewählt Für alle Compounds wurden Zug- und Biegefestigkeiten, Kerbschlagzähigkeit, Wärmeformbeständigkeit und Fließeigenschaften bestimmt.
Parallel dazu wurde ein CAD-Modell des Schwellendesigns angefertigt. Mit den gemessenen Festigkeitskennwerten wurden Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Hierbei wurde der 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN 13230-3 [5] am Schwellenblock rechnerisch simuliert, der später im Rahmen des Zulassungsverfahrens maßgeblich ist. Der Krafteintrag erfolgt mittig von oben auf die Schiene, während der Schwellenblock an zwei Stellen aufgelagert ist. Bild 1 zeigt die verschieden stark belasteten Bereiche im Schwellenblock. Im Bereich der Lasteinleitung sowie an den Lagern werden die höchsten Belastungen erreicht.

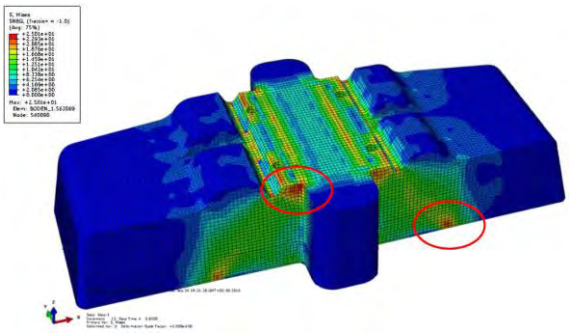


Bild 1 Ergebnisse der FEM-Simulation der 3-Punkt-Biegebelastung eines Schwellenblocks. Rot: stark belastete Bereiche. (Quelle: KIT-FAST [6])

Auf Basis der Messungen und der Berechnungen wurden das Schwellendesign optimiert und zunächst zwei mögliche Materialkombinationen für die Herstellungsversuche festgelegt.

2.2 Spritzgusswerkzeug

Die Schwellenblöcke bestehen jeweils aus einem Ober- und einem Unterteil. Bei der Fertigung wird die Verbindungsstange zwischen Ober- und Unterteil eingelegt und diese anschließend miteinander verschweißt. Die Position der Verbindungsstange wird durch einen Querriegel im Schwellenblock fixiert.

Um die Anzahl und die Lage der Schmelzezuführungen festzulegen, wurden vor der Herstellung der beiden Spritzgusswerkzeuge (je eines für Ober- und Unterteil) Moldflow-Berechnungen durchgeführt. In diesen Berechnungen wird der Fluss des geschmolzenen Kunststoffcompounds in die Spritzgussform simuliert. Da es sich um Versuchswerkzeuge handelt, die die Möglichkeit zu Änderungen und Anpassungen ermöglichen sollte, wurde es zum Teil aus Aluminium hergestellt.

2.3 Herstellung und Prüfung von Schwellenblöcken

Mit dem Werkzeug wurden erste Ober- und Unterteile hergestellt (Bild 2). An den Einzelteilen sowie an ganzen Schwellenblöcken wurden orientierende Versuche zur Festigkeit durchgeführt. Dabei wurde in einem ersten Inhouse-Test ein Drei-Punkt-Biege-Versuch nachgestellt (Bild 3).

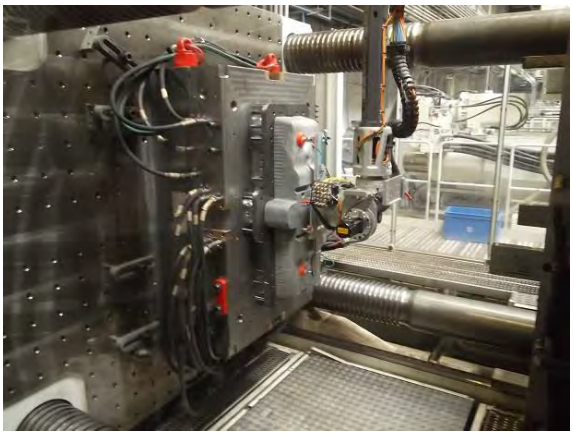


Bild 2 Blick in die Spritzgussanlage während des Auswurfs eines Oberteils (Quelle: Georg Utz GmbH)

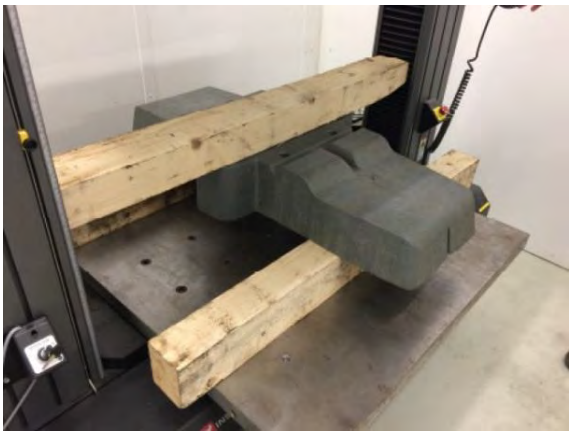


Bild 3 Nachbau des 3-Punkt-Belastungstests (Quelle: Georg Utz GmbH)

Außerdem wurde an der Technischen Universität München (TUM) die Auszugskraft der Schwellenschrauben ermittelt.

Nach diesen ersten orientierenden Prüfversuchen wurde die endgültige Materialrezeptur festgelegt und weitere Demonstratoren hergestellt. Um sicherzustellen, dass die Schwellendemonstratoren den notwendigen Belastungen im Gleis standhalten, werden weitere, mit dem Eisenbahnbundesamt festgelegte, Versuche an der TUM durchgeführt.

2.4 Lebenszykluskosten

Um Bauteile, die zwar für den gleichen Einsatzzweck konzipiert sind, sich aber konstruktiv unterscheiden und aus verschiedenen Werkstoffe bestehen, miteinander fair vergleichen zu können, genügt es nicht, die Anschaffungskosten, in denen sich lediglich die Kosten für Material und Herstellung widerspiegeln, zu betrachten. Allein der Materialpreis von Beton ist erheblich günstiger als der Preis von Kunststoffen, selbst wenn es sich dabei um Rezyklate handelt. Gleichzeitig ist BAU-Sand in vielen Ländern dieser Erde (im Gegensatz zu Deutschland) ein knapper Rohstoff, der ökologische Folgen durch Raubbau verursacht. Die zusätzliche Einbeziehung von beispielsweise Verlegekosten, Lärmschutzerfordernissen, Instandhaltungskosten, betriebsbedingten Unterbrechungen und auch Entsorgungskosten kann einen erheblichen Einfluss auf die die Gesamtkosten eines Produkts haben.
Aus diesem Grund wird eine Lebenszykluskostenanalyse vergleichend für die Schwelle2020 und die Betonmonoblockschwelle [7] durchgeführt. Als Basis für den Vergleich, die sogenannte funktionale Einheit, werden die Kosten für einen Kilometer Gleis über einen Zeitraum von 50 Jahren angesetzt. Der Lebenszyklus wird eingeteilt in drei Phasen: Herstellung, Nutzung und Lebensende (End of life). In die Betrachtung der Nutzungsphase gehen die Kosten für Transport, Montage und Verlegung sowie Wartung und Instandsetzung ein. Bei der Betrachtung der End-of-Life-Phase sind die Kosten für Demontage und Zerkleinerung, aber auch ein mögliches Recycling des Materials von Bedeutung. Es wird erwartet, dass sich der potenziell größere Verlegeabstand sowie die Möglichkeit des Materialrecyclings positiv auf die Bilanz der Schwelle2020 auswirken. Auch durch die geringere Schallemission wird eine Kostenreduktion erwartet.

3 Ausblick

Sobald sichergestellt ist, dass die Schwelle2020 die notwendigen Prüfungen für eine Zulassung durch das Eisenbahnbundesamt besteht, soll eine Teststrecke verlegt und die Schwellen im Praxiseinsatz getestet werden. Die bestätigte Erprobung im Fahrgleis eines mittelständischen Betreibers liegt verbindlich vor.

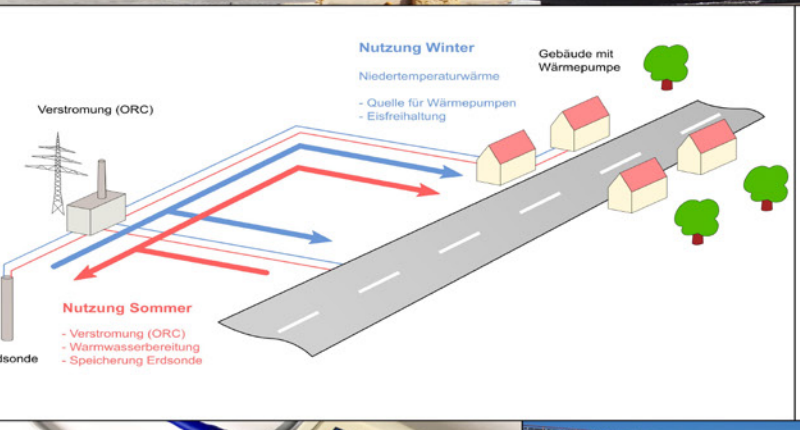
Literaturverzeichnis

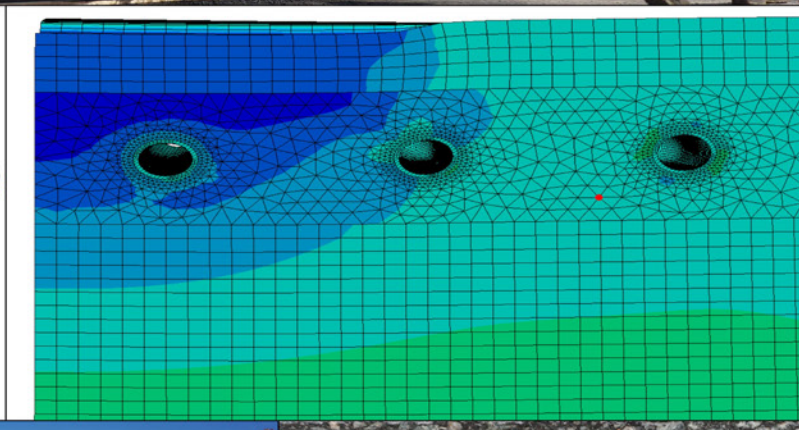
[1] Gespräch mit der DB Netz AG am 21.02.2017
[2] Hecht, Markus: Entstehung und Zusammensetzung des Lärms beim Schienenverkehr; Lärmreduzierungsmöglichkeiten. Vortrag auf dem VPI-Symposium Hamburg, 14.01.2014
[3] MSB-Management, 2006: Bahnschwelle. EP 1897992B1. 10.11.2010
[4] Frenzel, Jörg, Mayerhöfer, Jan, Frenzel, Jürgen: Neuartige Flügelschwelle in Bi-Block-Ausführung. Der EI- Eisenbahningenieur, 61 (2010), Nr. 3, S. 24
[5] DIN EN 13230-3:2014 Bahnanwendungen – Oberbau – Gleis- und Weichenschwellen aus Beton – Teil 3: Bewehrte Zweiblockschwellen; Deutsche Fassung prEN 13230-3:2014
[6] KIT-FAST: Interne Kommunikation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Teilinstitut Leichtbautechnologie, 2016.
[7] Sievers, Hauke, Siefer, Thomas, Pachel, Jörn: Life Cycle Cost von verlegten Schwellen im Netz der Hamburger HOCHBAHN. Technische Universität Braunschweig, 2014

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13XP5013A bis 13XP5013C gefördert.

SEDA

HighTech MatBau





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

Manuel Nullmeyer, F. Winkler GmbH & Co. KG, Sebastian Pinnau, Markus Clauß, TU Dresden

Kurzfassung: Im Forschungsprojekt SEDA soll der Entzug der solaren Wärme mittels Kollektorsystemen aus Asphaltbefestigungen betrachtet werden. Als Kollektoren sind Rohrsysteme, Gittersysteme (Rohre mit querliegenden Lamellen) und offenporige Schichten denkbar. Die entzogene Wärme soll mittels ORC-Prozess verstromt werden und zur ökologischen Energiegewinnung beitragen. Der erzielte Wegfall der Temperaturspitzen kann außerdem zu einer Verbesserung der Dauerhaftigkeit führen. Eine Nutzung des Systems zur Eisfreihaltung im Winter ist denkbar.

Stichworte: Asphalt, Kollektor, Wärmenutzung, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit, Straßenbau

1 Motivation und Zielstellung

Straßenbefestigungen unterliegen bedingt durch die Jahreszeiten großen klimatischen Schwankungen, die bei der Auswahl von Materialien und bei der Dimensionierung berücksichtigt werden müssen. So können sich Asphaltflächen unter sommerlichen Bedingungen bis auf über 60 °C aufheizen, wodurch die mechanische Belastbarkeit und somit auch die Lebensdauer reduziert werden. Andererseits ergibt sich durch die hohen Temperaturen aber auch ein großes Potential zur energetischen Nutzung von Asphaltflächen, indem die Wärme über geeignete Kollektorsysteme ausgekoppelt wird. Dies reduziert gleichzeitig auch die auftretenden Temperaturbelastungen im Straßenaufbau. Insbesondere im urbanen Raum bestehen vielfältige Nutzungsszenarien mit einem hohen Multiplikationspotential. Im Sommer kann die ausgekoppelte Wärme direkt genutzt, verstromt oder auch gespeichert werden. Die gespeicherte Wärme steht dann im Winter als Quelle für dezentrale Wärmepumpenheizungen in anliegenden Gebäuden oder auch zur Frost- und Schneefreihaltung der Straßenflächen zur Verfügung.

Voraussetzung für eine solche Nutzung ist die Verfügbarkeit geeigneter Kollektorsysteme sowie Kenntnisse über das thermische und mechanische Verhalten des Verbundes aus Straßenaufbau und Kollektor. Innerhalb des Projektes sollten daher verschiedene Kollektortypen mittels numerischer Simulation sowie experimentell untersucht werden. Für den experimentellen Teil wurde eine großmaßstäbliche Umsetzung verschiedener Kollektorvarianten auf dem duraBASt vorgesehen. Ziel ist die Erprobung und Weiterentwicklung von Verfahren zum Einbau der Kollektoren sowie die Gewinnung von Messdaten zum thermischen Verhalten und zur mechanischen Beanspruchung. Anhand der Ergebnisse soll das Nutzungspotential und der Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Straßenkonstruktionen bewertet werden.

2 Bau einer Teststrecke zur experimentellen Untersuchung

Schon vor dem Bau der Teststrecke auf dem duraBASt wurden experimentelle Voruntersuchungen auf dem Bauhof der F. Winkler GmbH & Co. KG durchgeführt. Begonnen wurde mit mehreren Testfeldern zur Untersuchung der Eigenschaften unterschiedlicher Rohrmaterialien, Rohrdurchmesser, Befestigungsvarianten und Bettungsmaterialien.

Bild 1 Eingebaute Rohrsysteme in den ersten Probeflächen

Hierbei konnten erste Materialien und Abmessungen ausgeschlossen werden. Beispielhaft zu nennen sind hier größere Rohrdurchmesser, welche zu Verformungen neigten, sowie Walzasphalt als Bettungsschicht. Letzteres musste ausgeschlossen werden, da sämtliche Rohre das Überfahren durch einen Asphaltfertiger nicht überstehen. Zwei untersuchte Varianten mit Gussasphalt und DSK-Mischgut zeigten gute Ergebnisse und weisen auch Vorteile gegenüber dem Walzasphalt beim Einbau auf ein Rohrkollektorsystem auf. Bei den Rohrmaterialien konnte eine Kombination aus PE-Xa bzw. PP mit einer Aluminiummantelung (zum Beispiel das System der TripleS-Systeme GmbH) als vorteilhaft für die geplante Verwendung ausgemacht werden. Die von der TripleS-Systeme GmbH verwendete Befestigung erzielte ebenfalls gute Ergebnisse. Zusätzlich wurden vor allem zur Verkürzung der Einbauzeiten neue Befestigungsvarianten erfolgreich ausgetestet.

Bild 2 Eingebautes Kollektorsystem zum Teil in Bettungsschicht aus Gussasphalt

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden weitere Probeflächen geplant und durchgeführt. Im zweiten Durchgang wurden die sinnvollsten Kombinationen aus den ersten Tests in unterschiedlichen Einbautiefen untersucht. Der Einbau in dünneren Schichten und damit in einer geringen Einbautiefe zeigte einbautechnisch keine Nachteile gegenüber dickeren Schichtdicken. Die geringere Einbautiefe hat eine positive Auswirkung auf den Wärmeertrag, da die Temperatur im Asphalt mit zunehmender Tiefe abnimmt. Zur Befestigung der Rohrkollektoren wurde eine Asphaltbewehrung mit starrem Gitter verwendet, an die die Rohre mittels Kabelbindern festgeknüpft wurden. Zusätzlich ist ein Gittersystem der WäTaS GmbH als Alternative zu den Rohrkollektoren getestet worden.
Anschließend wurden unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse die Probeflächen auf dem duraBASt konzipiert und verbaut.

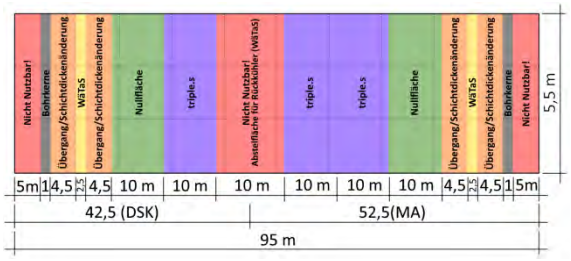


Bild 3 Flächeneinteilung der duraBASt-Probefläche

Die Fläche auf dem duraBASt wurde gemäß Bild 3 in zwei Bereiche mit Bettungsschicht aus Gussasphalt und DSK-Mischgut unterteilt. In jedem Bereich wurden jeweils das Gittersystem von WäTaS GmbH (Titelfoto oben links) und das Rohrsystem von TripleS-Systeme GmbH (Titelfoto oben rechts) angeordnet. Neben Referenzflächen waren Übergangsflächen für die Umsetzung der unterschiedlichen Schichtdicken zum Beispiel der Bettungsschicht (WäTaS GmbH: 5 cm / TripleS-Systeme GmbH: 4 cm) notwendig. Beim Einbau der Bettungsschichten, welcher von Hand erfolgte, konnten weitere Erkenntnisse für einen maschinellen Einbau gewonnen werden.

Bild 4 Einbau Bettungsschicht aus Gussasphalt

Bild 5 Einbau der Bettungsschicht aus DSK-Mischgut

Die Deckschicht wurde aus Asphaltbeton mit einem Asphaltstraßenfertiger und 2 cm Schichtdicke über die gesamte Fläche eingebaut.

Innerhalb der einzelnen Testfelder wurde eine Vielzahl an Sensoren verbaut (Bild 6). Die Integration dient der Erfassung der Temperaturzustände der einzelnen Schichten der Straßenkonstruktion sowie der durch die mechanische Belastung mittels des MLS30 hervorgerufenen mechanischen Beanspruchungen. Die ermittelten Daten bilden die Basis der Validierung der numerischen Modelle anhand der real auftretenden Beanspruchungen innerhalb der Straßenkonstruktion.

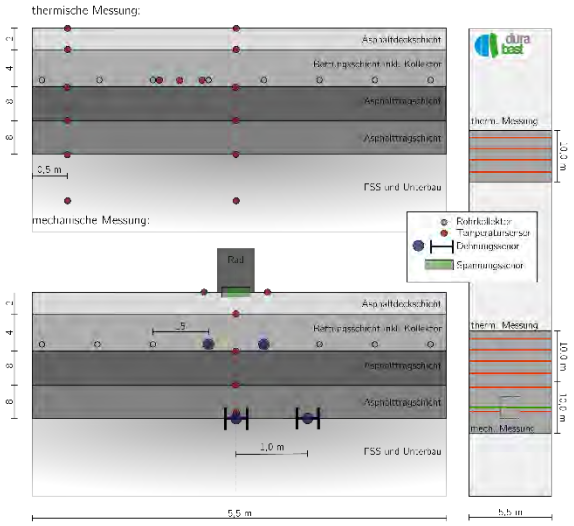


Bild 6 Querschnitt eines Testfeldes mit integriertem Rohrkollektor und Sensoren

Die thermischen Messungen und die mechanischen Belastungen werden voraussichtlich Anfang bis Mitte 2018 durchgeführt.

3 Numerische Simulation

Als Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Simulationen des thermischen und mechanischen Verhaltens der Straße-Kollektor-Systeme durchgeführt. Ein Vorteil der Modellierung ist die einfache Möglichkeit zur Durchführung von Parametervariationen, um den Einfluss einzelner Faktoren gezielt zu untersuchen.

3.1 Thermisches Verhalten

Zur Beurteilung des energetischen Nutzungspotentials insbesondere hinsichtlich einer möglichen Verstromung müssen erreichbare Temperaturen und Wärmeströme bei der Wärmeauskopplung mittels Kollektorsystem bestimmt werden. Um den Einfluss eines solchen Wärmeentzuges auf die mechanischen Belastungen bewerten zu können, müssen zudem die Temperaturverläufe in den einzelnen Schichten der Straßenkonstruktion bekannt sein.
Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden zunächst 3D-Modelle für ein Referenzsystem ohne Kühlung sowie für verschiedene Kollektorsysteme mit Rohren, berippten Rohren und einer durchströmten, porösen Asphaltschicht erstellt. Diese Varianten sind schematisch in Bild 7 dargestellt.

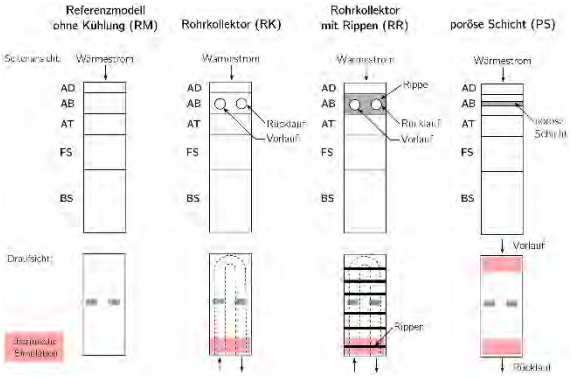


Bild 7 Schematische Darstellung der Kollektortypen für die thermische Simulation

Mit den 3D-Modellen wurden Simulationen zur Berechnung der Temperaturverläufe unter Vorgabe von klimatischen Bedingungen in einer warmen Sommerwoche durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Parameter wie die Rohrabstände, Rippenabstände, Rohrdurchmesser, Verlegetiefe des Kollektors sowie Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeträgerfluids variiert. Beispielhaft sind in Bild 8 die Verläufe der Oberflächentemperatur über den Simulationszeitraum für verschiedene Kollektorsysteme bei einer vorgegebenen Fluidaustrittstemperatur von 40 °C dargestellt. Im Vergleich zur unge-

kühlten Variante kann mit den Kollektoren eine geringe Reduzierung der Oberflächentemperatur um 1 bis 3 K erreicht werden.

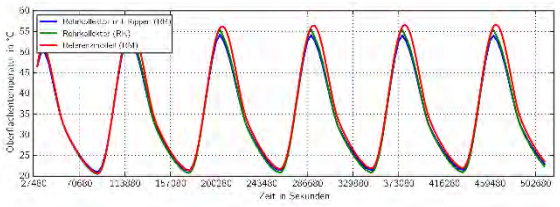


Bild 8 Vergleich des Oberflächentemperaturverlaufs für verschiedene Kollektoren (Verlegetiefe 8 cm)

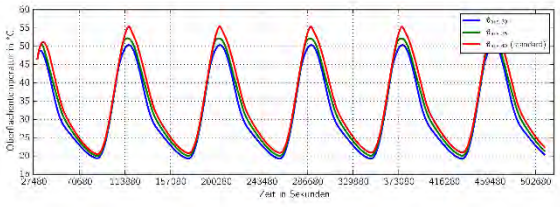


Bild 9 Vergleich des Oberflächentemperaturverlaufs für verschiedene Fluidaustrittstemperaturen beim Rohrkollektor (Verlegetiefe 8 cm)

Reduziert man die Fluidaustrittstemperatur z. B. durch Erhöhung des Massenstromes, so kann ein deutlich größerer Kühleffekt erreicht werden. Dieser Einfluss der Austrittstemperatur ist in Bild 9 für den Rohrkollektor (RK) dargestellt. Aus Sicht einer energetischen Nutzung sind die reduzierten Fluidtemperaturen aber nachteilig.
Für die Simulation längerer Zeiträume von mehreren Jahren unter Nutzung von Klimaprognosen wurde anschließend ein 1D-Modell für die Rohrkollektorvarianten in Modelica erstellt und anhand der Ergebnisse der 3D-Modelle validiert. Durch die Kopplung dieses Modells mit weiteren Komponenten, wie z. B. ORC-Prozess zur Verstromung und Erdsonde zur Speicherung, wird im Projekt auch das Verhalten des Gesamtsystems untersucht. Mit den Ergebnissen können Aussagen zum Nutzungspotential und zur Komponentenauslegung getroffen werden.

3.2 Mechanische Beanspruchung

Der Schichtenaufbau des Testfeldes wurde an Anlehnung an die standardisierte Bauweise »Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht« [3, Tafel 1] definiert (Bild 10). Die Dicke der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht wurde weiterhin auf das technisch geringste Maß verkleinert, so dass in der Straßenkonstruktion und im Kollektorsystem die höchstmöglichen Beanspruchungen auftreten.

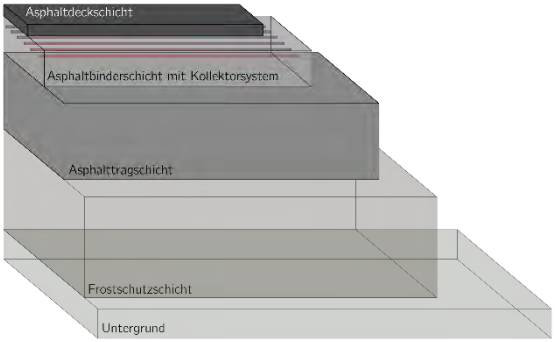


Bild 10 Skizze des Schichtenaufbaus der Straßenkonstruktion (Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht nach [3])

Die auf der Testfläche eingebauten Asphalte wurden mittels Kernbohrungen an definierten Stellen der Straßenkonstruktion entnommen und im Labor am Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau der Technischen Universität Dresden mittels des Spaltzug-Schwellversuches nach den [AL Sp-Asphalt, 2009] untersucht. Während der Versuche werden die zylindrischen Proben zyklisch vertikal belastet und die horizontale Verformung an der Mantelfläche des Probekörpers gemessen (siehe Bild 11). Aus dem Verhältnis der maximalen Belastung und der resultierenden Verformung der Asphaltprobe wird der absolute Steifigkeitsmodul berechnet. Da das Materialverhalten von Asphalt temperatur- und frequenzabhängig ist, werden unterschiedlichen Proben in einem Temperaturbereich von -10 °C bis 20 °C sowie bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen beprobt. Die einzelnen Versuchsergebnisse werden abschließend zur Masterfunktion des Asphaltes zusammengefasst. Mittels dieses funktionalen Zusammenhangs kann der absolute Steifigkeitsmodul für jede Temperatur und Frequenz berechnet werden. Weiterhin wurde das Ermüdungsverhalten bei dauerhaften zyklischen Belastungen der Asphalte bestimmt. Dazu werden Asphaltproben bei einer Temperatur von 20 °C und einer Frequenz von 10 Hz bis zum Versagen der Probe belastet. Das Verhältnis aus anfänglicher elastischer Dehnung der Asphaltprobe und der maximal ertragbaren Lastwechselzahl dient anschließend der Bewertung der ertragbaren Überrollungen durch den Straßenverkehr [2].

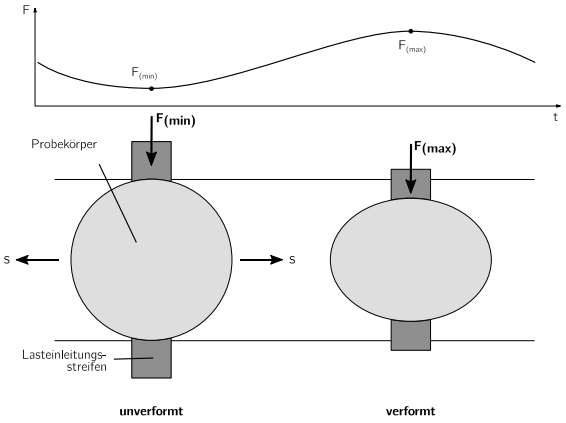


Bild 11 Funktionsprinzip des Spaltzug-Schwellversuches

Auf Basis der im Projekt ermittelten Materialparameter und geometrischen Bedingungen der Straßenkonstruktion wurde ein detailliertes Finite-Elemente-Model für die Testfelder auf dem duraBASt erstellt. Das Modell berücksichtigt die unterschiedlichsten Beanspruchungszustände aus Temperatur und Verkehrslasten. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass durch Integration der Rohre ein veränderter Spannungs- und Dehnungszustand im Vergleich zu konventionellen Straßenkonstruktionen auftreten (Bild 12). Der Vergleich der simulierten und gemessenen Daten erfolgt nach Beendigung der Belastungsversuche.

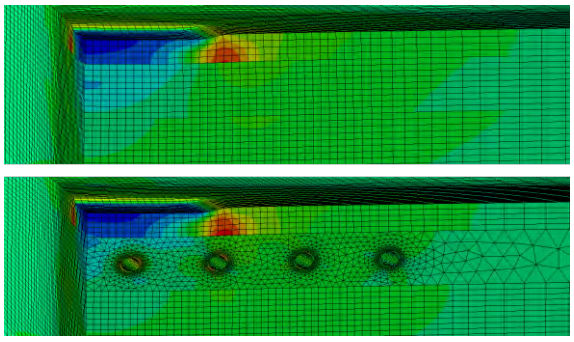


Bild 12 Hauptdehnung innerhalb der Straßenkonstruktion (oben) konventioneller Aufbau (unten) mit integrierten Rohrkollektor, 2000-fach überhöhte Darstellung, Temperaturprofil 12 nach [2]

4 Fazit

Die aufgeführten Ergebnisse der numerischen Simulation und der experimentellen Untersuchung sind positiv und zeigen Potentiale für eine mögliche Umsetzung eines solchen Systems auf. Der Einbau der Systeme in den verschiedenen Probeflächen zeigt, dass das System einbautechnisch umsetzbar ist. Verschiedene Parameter, wie zum Beispiel die Materialauswahl, konnten auf diesem experimentellen Weg getroffen bzw. auf sinnvolle Varianten begrenzt werden. Die numerische Simulation konnte weitere Parameter, wie zum Beispiel sinnvolle Rohrabstände, betrachten. Zur Verifizierung der Daten werden nun die Belastungen mit dem Mobile Load Simulator auf dem duraBASt benötigt. Nach der Durchführung und Analyse der thermischen und mechanischen Belastungen können weitere genauere Aussagen zur Umsetzbarkeit getroffen werden.

Literaturverzeichnis

[1] AL Sp-Asphalt – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwell-Versuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2009

[2] RDO Asphalt – Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Verkehrsflächen mit Asphaltdeck-schicht. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2009

[3] RStO – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2012

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N13605 bis 13N13608 und 13N13610 gefördert.

SMART-DECK

HighTech MatBau

Multifunktionales Schutz- und Verstärkungssystem für Brückenbauwerke

Dr.-Ing. Till Büttner, EUROVIA Beton GmbH, NL Bauwerksinstandsetzung, ZS Köln Bonn, Troisdorf; Viviane Adam, M.Sc., Institut für Massivbau, RWTH Aachen University, Aachen; Carla Driessen, M.Sc., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, Aachen; Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach, Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, Aachen

Kurzfassung: Im Rahmen des Verbundprojektes wird ein multifunktionales System erarbeitet. Es ermöglicht ein vollflächiges Echtzeit-Feuchtemonitoring, einen abschnittsweise steuerbaren präventiven kathodischen Korrosionsschutz (pKKS) und eine Erhöhung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit bei Bestandsbrücken. Infolge des Monitorings können Schäden in der Abdichtungsebene frühzeitig erkannt und, in Kombination mit dem pKKS, Verkehrsbehinderungen vermieden werden, da eine Erneuerung des Brückenbelages 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 Spezialmörtel realisiert. Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens werden einerseits Laboruntersuchungen durchgeführt und andererseits zur Projekthalbzeit und zum Projektende Demonstratoren hergestellt, die die Leistungsfähigkeit des Systems demonstrieren sollen. Als Kooperationspartner sind die Eurovia Beton GmbH, Niederlassung Bauwerksinstandsetzung (Hofheim-Wallau; Projektkoordinator), die Bundesanstalt für Straßenwesen (Bergisch-Gladbach), die FTA mbH (Albstadt), die Massenberg GmbH (Essen), die instakorr GmbH (Darmstadt), die Sto SE & Co. KGaA (Stühlingen) sowie das Institut für Bauforschung – Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite (ibac) und das Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen beteiligt.

Stichworte: Textilbeton; Carbon; Brückeninstandsetzung; KKS; Monitoring

1 Das System SMART-DECK

Unterläufige Abdichtungen und schadhafte Fugen- oder Übergangsprofile stellen durch Begünstigung von Chlorideintrag eine Gefährdung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbrücken dar. Resultierende Korrosionsschäden am Betonstahl sind 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 bietet durch drei Funktionalitäten eine Lösungsmöglichkeit: Das System soll erstmals ein vollflächiges Echtzeit-Feuchtemonitoring, einen abschnittsweise steuerbaren präventiven kathodischen Korrosionsschutz (pKKS) und eine Tragfähigkeitssteigerung in Querrichtung bei Bestandsbrücken ermöglichen. Durch das Monitoring können Schäden in der Abdichtungsebene frühzeitig erkannt werden. Das anschließende Aktivieren des pKKS ermöglicht einen Aufschub erforderlicher Baumaßnahmen, da diese über Jahre hinaus in verkehrsgünstige Perioden verschoben werden können. Verkehrsbehinderungen werden vermieden, denn die Erneuerung des Brückenbelages ist nicht zeitnah erforderlich. Das Monitoring, der pKKS und die verstärkende Wirkung werden durch eine textile Carbonbewehrung in Kombination mit einem Spezialmörtel realisiert. Der filigrane Aufbau der Hochleistungsmaterialien erlaubt eine Steigerung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit der Fahrbahnplatte in Querrichtung ohne signifikante Erhöhung des Eigengewichts der Tragkonstruktion.

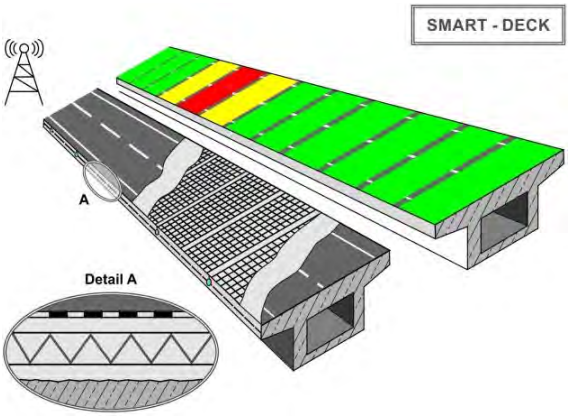


Bild 1 Aufbau von SMART DECK und Zustand der Abdichtung; grün: intakt, gelb: signifikanter Widerstandsabfall; rot: Grenzwert Widerstand unterschritten, Undichtigkeiten vorhanden und pKKS erforderlich

SMART-DECK soll die genannten Funktionalitäten in sich vereinen, wobei diese modular eingesetzt werden können.
Der grundsätzliche Aufbau von SMART-DECK ist wie folgt (vgl. Detail 1; Bild 1):

- 35 mm Hochleistungsmörtel mit
- 2-Lagen Carbonbewehrung mit elektrischen Anschlüssen für Monitoring und pKKS, die nach außen geführt werden.

Die obere und untere Mörteldeckung beträgt 10 mm, sodass der Lagenabstand der textilen Bewehrung 15 mm beträgt. Um eine Unterteilung des Brückenüberbaus in einzelne Messfelder zu ermöglichen, ist die Bewehrung in Längsrichtung ohne Übergreifung (= elektrischer Kontakt) auszuführen. In Querrichtung (Verstärkungsrichtung) sind hingegen statisch wirksame Übergreifungsstöße anzuordnen. Je nach erforderlicher Schichtdicke erfolgt der Gradientenausgleich vor der Applikation der Textilbetonergänzungsschicht.
SMART-DECK kann als Hightech-System sowohl für Neubauten als auch für Bestandsbauwerke sowie in Kombination mit den bisherigen bewährten oder zukünftigen Brückenbelägen und Regeldetails nach ZTV-ING verwendet werden.

2 Die Komponenten von SMART-DECK

2.1 Textile Bewehrung

Seit Beginn der Projektlaufzeit erfolgten systematische Untersuchungen verschiedener Carbongelege in Hinblick auf ihre Leitfähigkeit und ihre Tragfähigkeit. Für den Kleindemonstrator wurden Carbonmatten mit einer Maschenweite von 38 mm und einer speziell für SMART-DECK entwickelten Epoxidharztränkung verwendet, um die elektrische Leitfähigkeit des Tränkungsmaterials zu erhöhen.

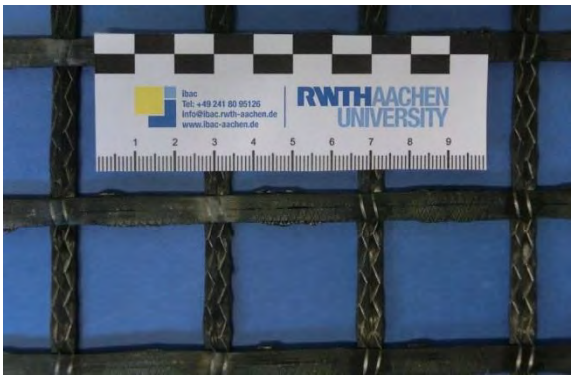


Bild 2 Carbontextilbewehrung in Mattenform

Die Carbonmatten werden mit einer Breite von 1,20 m hergestellt. Da in Brückenlängsrichtung keine Übergreifungsstöße vorgesehen sind, bestimmt die Mattenbreite die Maximalbreite der Messfelder. Die beiden Lagen der textilen Bewehrung sind kontaktlos einzubauen, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Dazu wurden spezielle Abstandhalter entwickelt. Zur Qualitätssicherung werden sie werksseitig angebracht, sodass eine Auslieferung von 3D-Gelegen erfolgt. Dies erleichtert gleichzeitig den Einbau auf der Baustelle. Die Abstandhalter sind so ausgebildet, dass sie zusätzlich dafür sorgen, dass der geplante Abstand von 10 mm zwischen Altbetonoberfläche zur unteren Textillage eingehalten werden kann. Um ein Aufschwimmen der Textilien beim Verdichten zu verhindern, werden in regelmäßigen Abständen Kunststoffdübel angebracht.

2.2 Hochleistungsmörtel

Bei dem verwendeten Mörtel handelt es sich um einen PCC mit einem Größtkorn von 4 mm. Der Mörtel wurde iterativ mehrfach weiterentwickelt, um den verschiedenen und teilweise konkurrierenden Anforderungen aus Verstärkung, Monitoring, KKS und Einbaupraxis gerecht zu werden. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Einstellung der rheologischen Eigenschaften des Mörtels dar. Er sollte einerseits eine ausreichende Fließfähigkeit aufweisen, um die Textilen vollständig umschließen zu können und zudem eine gute Förderleistung zu ermöglichen. Andererseits sollte der Mörtel über eine geeignete Standfestigkeit verfügen, um eine Querneigung der Brückenoberfläche von mindestens 2,5 % realisieren zu können.

3 Erprobung von SMART-DECK – Kleindemonstrator System SMART-DECK

3.1 Herstellung

Um die Erarbeitung der erforderlichen Komponenten für die Ergänzungsschicht und das Gesamtsystem frühzeitig in einem baustellengerechten Maßstab erproben zu können, wurde als Halbzeitmeilenstein des Forschungsprojektes ein Kleindemonstrator hergestellt. Der Kleindemonstrator hat eine Größe von rd. 80 m² und wurde auf einer speziell für das Projekt hergestellten Grundplatte ausgeführt. Die Grundplatte wurde auf dem Gelände der BASt hergestellt und repräsentiert eine typische Fahrbahntafel einer Betonbrücke.

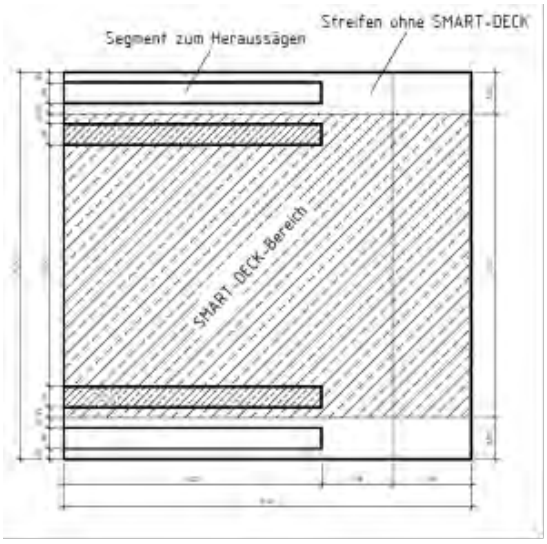


Bild 3 Übersichtszeichnung des Kleindemonstrators /BASt/ mit Angabe der unterschiedlichen Herstellbereiche. Die Herstellrichtung von SMART-DECK erfolgt von oben nach unten auf dem Bild

Wie in Bild 3 erkennbar ist, wurde SMART-DECK nicht vollflächig über den gesamten Probekörper ausgeführt. Die beiden ausgesparten Randbereiche dienten zur Entnahme von Referenzproben zur Bestimmung der Tragfähigkeit. Insgesamt wurden aus dem Kleindemonstrator vier Proben zur Quantifizierung der Verstärkungswirkung von SMART-DECK in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades der Grundkörper herausgesägt.
Der Grundkörper wurde durch eine Rüttelbohle verdichtet und anschließend konventionell nachbehandelt. Als Beton für den Grundkörper wurde ein für den Brückenbau typischer C30/37 verwendet. Bei der Applikation von SMART-DECK wies der Grundkörper ein Alter von ca. vier Monaten auf.

Bei der Herstellung des Kleindemonstrators wurde darauf geachtet, dass alle Einzelschritte auf einem Brückenbauwerk ausführbar sind, d. h. alle Arbeitswege, Material- und Geräteandienung analog zu einer Brückentafel erfolgten. Die Herstellung wurde in zwei Bauabschnitte unterteilt. Eine Material-/Personalandienung zur Einbaustelle ist nur von der Seite möglich, da die querdruckempfindliche textile Bewehrung nicht betreten werden darf.
Die Erstellung der elektrischen Anschlüsse und Kabel erfolgte auf der Baustelleneinrichtungsfläche, um eine Anpassung der Kabel an die reale Geometrie zu ermöglichen. Wie auf dem nachfolgenden Bild zu sehen, wurde die Bewehrung in Brückenlängsrichtung ohne eine Übergreifung ausgeführt, um eine elektrische Trennung zwischen den einzelnen Feldern auszuführen.

Bild 4 Textile Bewehrung nach dem Einbau und abgeschalte Arbeitsfuge

Im Anschluss an das Verlegen der Bewehrung wurde der Hochleistungsmörtel eingebaut. Die Betonage erfolgte über eine Arbeitsbühne, die vor der Rüttelbohle angeordnet war. Der Mörtel wurde über eine Länge von max. 60 m Förderschlauch direkt aus einem Silo zur Einbaustelle gefördert. Die Konsistenz des Mörtels erlaubte eine Verdichtung mittels Rüttelbohle ohne anschließende Nachbearbeitung der Fläche.

Bild 5 fertiggestellter 1. Bauabschnitt von SMART-DECK – Oberfläche nur mittels Verdichten bearbeitet

Die Herstellung des Kleindemonstrators hat gezeigt, dass die Realisierung von SMART-DECK in dem für den Kleindemonstrator gewählten Maßstab grundsätzlich funktioniert. Das System konnte gemäß den Vorgaben des Forschungsprojekts eingebaut werden. An den Schnittkanten der Probekörper zur Bestimmung der Verstärkungswirkung wurde deutlich, dass die Lage der textilen Bewehrung während der Betonage sichergestellt wurde.

3.2 Verstärkung

Zur Untersuchung der Verstärkungswirkung wurden insgesamt vier Ausschnitte mit einer Breite von b = 0,5 m aus der Demonstratorplatte gesägt und am Institut für Massivbau der RWTH Aachen bis zum Bruch belastet (Bild 6).

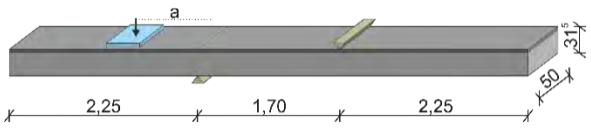


Bild 6 Versuchsaufbau

Die Sägeschnitte wurden aus zwei unterschiedlichen Bereichen entnommen, um einen hohen und geringen Längsbewehrungsgrad der Stahlbetonplatte zu untersuchen. In den Randbereichen wurde keine Verstärkungsschicht auf die Demonstratorplatte aufgebracht, sodass zu jedem Versuch am verstärkten Plattenstreifen ein Referenzversuch an einem unverstärkten Versuchskörper durchgeführt werden konnte. Mit SMART-DECK soll die Biege- und Querkrafttragfähigkeit der Brückenfahrbahnplatte in Querrichtung erhöht werden. Im Versuch wird der Lastfall eines außen fahrenden LKW simuliert, der den Kragarm der Fahrbahnplatte belastet und Zugkräfte an der Oberseite des Kragarms erzeugt. Dabei wird die Radlast des LKW als Einzellast in den Plattenstreifen eingeleitet. Zwischen Zylinder und Versuchskörper wird eine quadratische Lastverteilungsplatte mit Kantenlängen von 40 cm angeordnet, was den Abmessungen einer LKW-Radlast nach Eurocode 1, Teil 2 (DIN EN 1991-2) entspricht. Die Belastung erfolgte weggesteuert. Bild 7 zeigt einen eingebauten Sageschnitt vor dem Versuch.

Bild 7 Eingebauter Versuchskörper im Versuchsstand

Die Versuche mit dem geringeren Längsbewehrungsgrad wurden bis zur Lastaufnahmekapazität belastet. Bei den Versuchskörpern, die einen hohen Längsbewehrungsgrad aufwiesen, war der Bruch durch einen für das Querkraftversagen ohne Querkraftbewehrung typischen geneigten Biegeschubriss bei gleichzeitig abrupt auftretendem, deutlichem Lastabfall gekennzeichnet. Insgesamt stellte sich bei den Versuchen an den verstärkten Bauteilen ein feineres Rissbild sowie eine deutlich geringere Durchbiegung bei vergleichbarer Belastung ein. Bei den Versuchen mit geringerem Längsbewehrungsgrad konnten im Vergleich zwischen verstärktem und unverstärktem Bauteil Steigerungen der Momententragfähigkeit zwischen 90 und 170 % erreicht werden. Die Querkrafttragfähigkeit der Versuchskörper, die einen höheren Längsbewehrungsgrad aufwiesen, konnte durch SMART-DECK um etwa 20 bis 55 % gesteigert werden.

3.3 Monitoring/pKKS

Der Kleindemonstrator besteht aus messtechnischer Sicht aus vier voneinander elektrisch entkoppelten Messfeldern. Neben der Demonstatorfläche wurde ein Messschrank mit der für die Monitoring- und pKKS-Funktionalität notwendigen Technik eingerichtet (Bild 8). Die drei prototypischen Messeinheiten können jeweils den Widerstand von bis zu vier elektrisch voneinander getrennten Messfeldern sowie zusätzlich einen tiefengestaffelten Multiringwiderstand messen. Für den Kleindemonstrator werden noch nicht alle Kanäle dieser Messeinheiten benötigt. Weiterhin gibt es jeweils einen Bewehrungsanschluss und einen Anschluss für Referen-

zelektroden, die in der Platte verbaut sind. Die Daten können via Internet durch eine Remotedesktopverbindung jederzeit abgerufen werden.

Bild 8 Messeinheiten im Messschrank

Durch künstlich hergestellte Fehlstellen am Demonstrator und begleitende numerische Simulationen wird berechnet, welche Fehlstellengröße bei welchen Widerstandswerten der Gesamtfläche und welchen Widerstandswerten der Fehlstelle detektierbar sind. Zusätzlich wurden Einflussparameter wie Lage, Größe und Form der Fehlstelle untersucht.

Die Funktionalität des pKKS wird durch Ausschaltmessungen überprüft. Dafür erfolgt eine Polarisierung mit 1 V über mehrere Wochen. Anschließend wird der KKS-Betrieb abgeschaltet. Das Ausschaltpotential wird gemessen und die Potentialänderung über 24 h beobachtet. Liegt das Potential nach dieser Zeit mindestens 100 mV über dem Ausschaltpotential, gilt der KKS als wirksam. Da durch SMART-DECK aber ein präventiver KKS betrieben werden soll, wird gleichzeitig in Laborversuchen untersucht, welche Spannungen zur Verhinderung von Chlorideintrag erforderlich sind. Die negative Polarisation der Bewehrung reduziert die Chloridwanderung zum Bewehrungsstahl und das Einsetzen von Korrosion wird verhindert. Noch passivierter Stahl ist leichter zu polarisieren. Daher ist im Rahmen der Laboruntersuchungen eine geringere kathodische Polarisation nötig als bei Bestandsbrücken, um das Schutzpotential zu erreichen.

4 Zusammenfassung

Die dargestellten Erkenntnisse zu SMART-DECK lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- SMART-DECK konnte im Rahmen des Kleindemonstrators unter Baustellenbedingungen in einem für Brückenbauwerken vergleichsweise kleinen Maßstab realisiert werden. Die bei der Ausführung gewonnenen Erkenntnisse dienen dem Forschungsprojekt zur Optimierung der Materialien und der Prozessparameter.
- Im Rahmen der Untersuchungen der verstärkenden Wirkung des Systems konnte gezeigt werden, dass durch SMART-DECK eine signifikante Steigerung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit der Brückenfahrbahnplatte erreicht werden kann. Zudem werden die Durchbiegungen bei Belastung verringert und es stellt sich ein feineres Rissbild ein. Die damit einhergehende Reduzierung der Rissweiten beeinflusst das Tragwerk in Hinblick auf das mögliche Eindringen von tausalzhaltigem Wasser positiv.
- Die Grundlage für das Feuchte-Monitoring durch die vollflächige Widerstandsmessung am Kleindemonstrator inklusive der Datenübertragung via Internet wurde erfolgreich getestet.

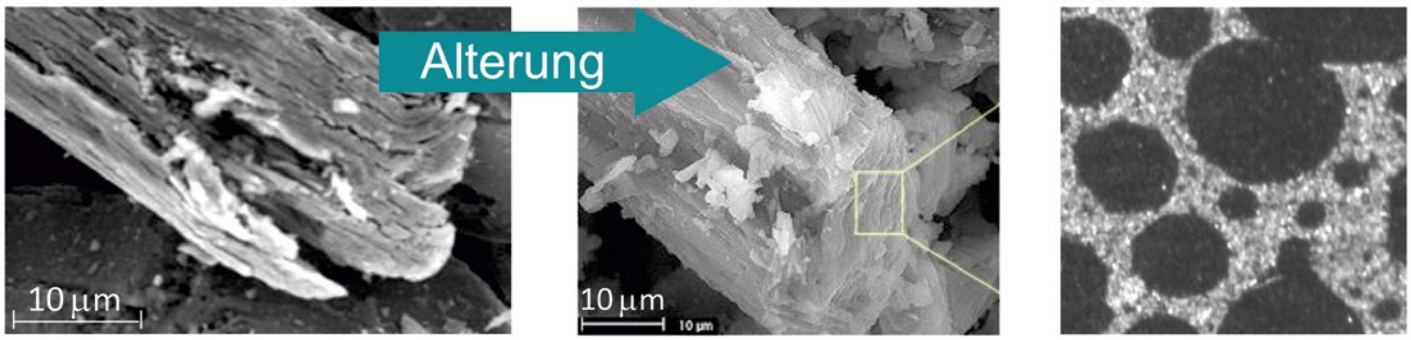
Weiterhin lässt sich feststellen, dass auch bei Brückenneubauten eine Anwendung von SMART-DECK aufgrund der langfristigen wirtschaftlichen Vorteile für den Nutzer erwartet werden kann. Die Technologie des intelligenten multifunktionalen Verstärkungs- und Schutzsystems aus textilbewehrtem Hochleistungsmörtel ist später auf andere Anwendungsfelder (Parkbauten, Tunnel, Meeresbauwerke) übertragbar.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts unter den Förderkennzeichen 13N13103 bis 13N13106 und 13N13108 und beim VDI Technologiezentrum GmbH, die seitens des BMBF mit der Beratung und der Umsetzung der Förderrichtlinien betraut wurden. Außerdem gilt der Dank allen Projektpartnern.

SULFOAM

HighTech MatBau



CASEA
IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

FIB

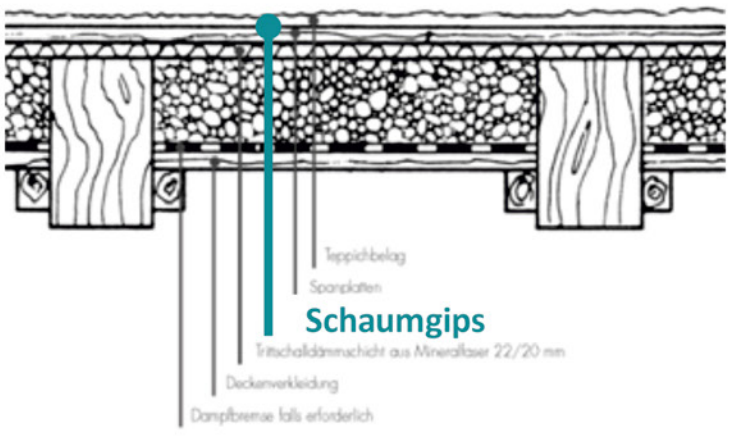
SULFOAM

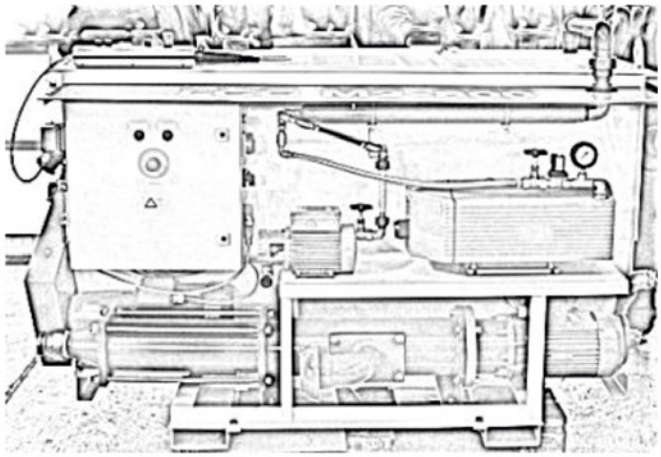
MPA

V.E.P.

BENNERT
GmbH

AML
ANLAGENTECHNIK





Neue Dämm- und Verfüllstoffe aus Schaumgips

A. Hübner, H. Dreuse, S. Nowak, CASEA GmbH, MFPA Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Ellrich, Weimar

Kurzfassung: Auch heute werden in unseren Gebäuden Dämmmaterialien aus expandiertem Polystyrol (EPS) verwendet. Diese haben eine Reihe von Nachteilen: 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. 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 Dämm- und Ausgleichsschicht unter Estrichen und in Geschossdecken. Ziel des Verbundvorhabens ist die Erforschung und die Entwicklung eines porösen Leichtbaustoffes auf Calciumsulfatbasis (Schaumgips) zur Verwendung als horizontale Dämmschicht und zur Verfüllung von mehrschaligem sulfathaltigen Mauerwerk.

Stichworte: Dämmstoff, Dämmschichten, expandierender Polystyrol (EPS), Schaumgips, Wärmeschutz, Brandschutz, recyclebar, Dachgeschossdecken, sulfathaltiges Mauerwerk

1 Beschreibung des Vorhabens

Dämmstoffe auf Basis von EPS (expandiertes Polystyrol) sind Standard im europäischen Raum. Gemäß GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie) wurden 2010 allein in Deutschland 9.583.000 m³ expandiertes Polystyrol und 15.800.000 m³ Mineralwolle verbaut.

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, recycelfähigen und schadstoffreduzierenden Baustoffen gewinnt vermehrt an Bedeutung.

Alternativen auf Basis mineralischer Rohstoffe, wie in diesem Projekt 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.

2 Zielsetzungen 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 Wär-

medämmung 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, recycelfähigen und schadstoffreduzierenden Baustoffen

3 Aktueller Ergebnisstand

Als erster wichtiger Arbeitsschritt konnten stabile, den Zielvorgaben entsprechende Schaumbaustoffmischungen manuell hergestellt werden. Vorzugsrezepturen wurden ermittelt. Die praxisorientierten Tests an Bauteildemonstratoren wurden abgeschlossen.
Die Untersuchungen der künstlichen Alterung wurden im kleintechnischen Maßstab mithilfe eines speziell entwickelten und gebauten Alterungsdemonstrators durchgeführt (Bild 1).

Bild 1 Alterungsdemonstrator [Quelle: SULFOAM-Gruppe]

Nach den notwendigen Anpassungen und Optimierungen erlaubte der Demonstrator die Herstellung von gealterten Beta-Halbhydratbindemitteln, die sich durch eine Reihe von positiven Eigenschaften auszeichnen. Zu diesen zählen eine deutlich verringerte spezifische Oberfläche nach BET, ein verminderter Wasseranspruch, eine höhere Einstreumenge und eine erhöhte Lagerungsstabilität.
Später lagen im Labor erprobte Schaumbaustoffmischungen mit optimaler Additivkombination und unter Verwendung von gealtertem Stuckgips vor. Sie waren für die unterschiedlichen Zielanwendungen einsetzbar. Die dazugehörigen praxisorientierten Tests wurden abgeschlossen und bewertet. Für die Herstellung der Schaumbaustoffe auf Versuchsbaustellen wurde eine speziell gebaute Schaumgipsanlage verwendet (Bild 2). Mit ihrer Hilfe konnten im Chargenbetrieb die im Labor ermittelten und erprobten Rezepturen auf Versuchsbaustellen getestet werden.

Bild 2 Schaumgipsmörtelanlage für Baustellenversuche [Quelle: SULFOAM-Gruppe]

Für das Testen der Eignung des Schaumbaustoffes als Verfüllbaustoff in sulfathaltigem Mauerwerk wurde die Verfüllung der Mauerwerksdemonstratoren durchgeführt (Bild 3). Die positiven Ergebnisse im Hinblick auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften bestätigten eine gute Eignung des Mörtels für den vorgesehenen Zweck.
Der zweite große Anwendungsbereich ist die Herstellung von Ausgleichsschichten unter schwimmenden Estrichen sowie von Dämmschichten für die Sanierung von Dachgeschossdecken unter Kaltdächern. Die Rezeptur für diesen Zweck wurde auf der Basis einer vorkonfektionierten Calicumsulfatbindermischung entwickelt. Eine der wichtigsten Merkmale dieser Anwendungsform ist die leichte Anpassung der Rezeptur für die Herstellung der Leichtmörtelausgleichsschichten aus Gipsschaummörtel sowie für die Herstellung von Estrichen. Auf diese Weise können komplette Bodenbauteile mit nur einem Baustoff hergestellt werden.

Bild 3 Mauerwerksdemonstrator für Versuchszwecke [Quelle: SULFOAM-Gruppe]

4 Fazit

Die heute in unseren Gebäuden verwendeten Dämmmaterialien aus expandiertem Polystyrol (EPS) 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. Auch in Neubauten ergibt sich ein weites Anwendungsfeld im klassischen Wärme- und Brandschutz, hier insbesondere als Dämm- und Ausgleichsschicht unter Estrichen und in Geschossdecken. Die Wohnklimaregulierung mit unbedenklichen, recycelfähigen und schadstoffreduzierenden Baustoffen gewinnt vermehrt an Bedeutung. Es ist in diesem Verbundvorhaben gelungen, einen porösen Leichtbaustoff auf Calciumsulfatbasis (Schaumgips) zur Verwendung als horizontale Dämmschicht und zur Verfüllung von mehrschaligem sulfathaltigem Mauerwerk zu entwickeln. Der Schaumbaustoff wird zweikomponentig aus einem Schaum und einem Calciumsulfatbinderleim in-situ auf der Baustelle hergestellt und eingebaut. Dazu bedient man sich einer speziell entwickelten Schaumgipsmörtelanlage.

Danksagung

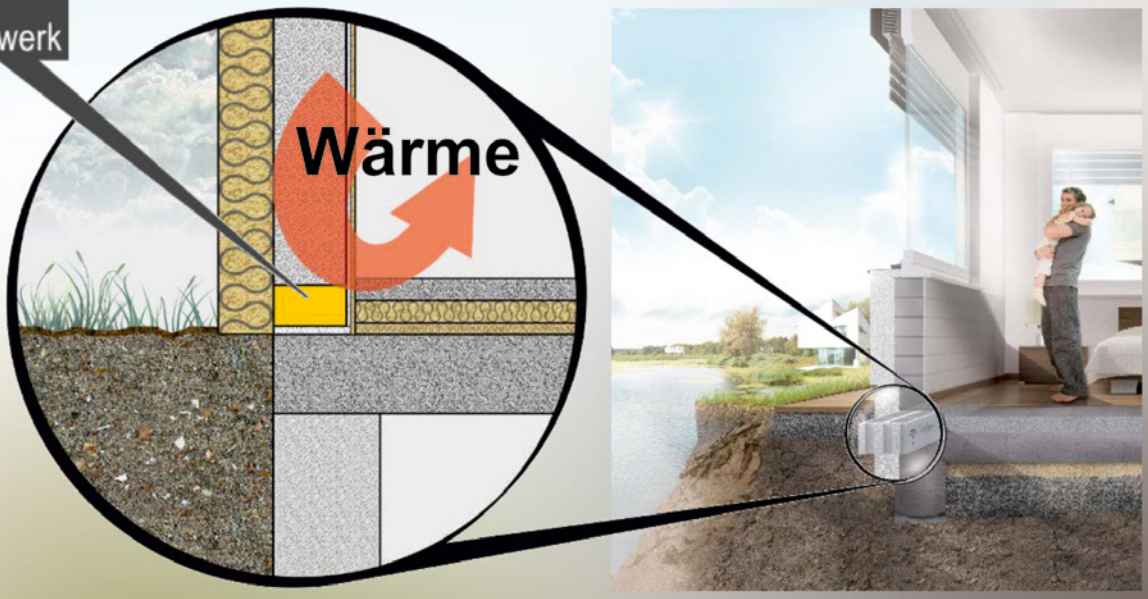
Der Verbund dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung des Projektes (FKZ: 13N13461, 13N13462 und 13N13464 bis 13N13467).

THELMA

HighTech MatBau

THELMA

Thermisch wirksame Bauelemente für das Mauerwerk



KIT Karlsruher Institut für Technologie

hydro ment PUTZE UND ADDITIVE

Schöck

Büro für Baukonstruktionen Karlsruhe - Dresden - Schwerin

Thermisch wirksame Bauelemente für das Mauerwerk

Michael Haist, Viktória Malárics-Pfaff, Jan P. Höffgen, Frank Schilling, Harald S. Müller (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie bzw. Institut für Angewandte Geowissenschaften), Alexander Jurecka, Hubert Fritschi (Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden), Markus Hauer, Katharina Rupp (BfB Büro für Baukonstruktionen GmbH, Karlsruhe), Franz-Josef Strauß, Johannes Fuchs (Hydroment GmbH, Buchloe)

Kurzfassung: Das vorgestellte Projekt befasst sich mit der Entwicklung eines hochwärmedämmenden, tragfähigen, nicht-wassersaugenden Mauersteins für den Sockelbereich von Gebäuden. Dafür wurden drei Ansätze miteinander kombiniert: die Weiterentwicklung eines Leichtbetons durch die Zugabe von Luftporenbildner und weiterer Additive, die Beeinflussung des Phononentransports in der Zementsteinmatrix und die geometrische Gestaltung des Mauersteins. Hierdurch konnte die Wärmedämmwirkung des Bauelements signifikant erhöht werden.

Stichworte: Beton, Leichtbeton, Wärmedämmung, Wärmetransport, Additive, Tragfähigkeit

1 Einleitung

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 [1]. 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 [2].

Die bauliche Umsetzung dieser Anforderungen ist heute geprägt durch die Verwendung großer Schichtdicken polymerer Dämmstoffe (Wärmedämmverbundsystem, WDVS). Die üblichen Dämmstärken liegen dabei je nach Dämmstandard des Gebäudes zwischen ca. 12 cm (EnEV-Standard) und ca. 30 cm (Passivhaus-Standard), wobei hier zumeist Dämmplatten auf Basis von Polystyrol zum Einsatz kommen. Wie Bild 1 (a) zeigt, sind diese Wandaufbauten 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. Gleichzeitig ist durch die in diesen Bereichen eines Gebäudes nahezu unvermeidliche Durchfeuchtung des Dämmstoffes mit ausgeprägten Einbußen bei der Wärmedämmwirkung der Isoliermaterialien zu rechnen (siehe Bild 1 (b)). 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.

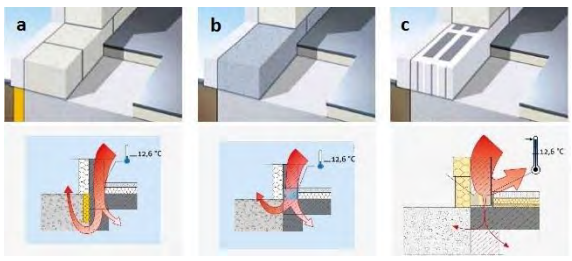


Bild 1 Wärmetechnisches Problem im Sockelbereich eines Gebäudes bei einer Wärmedämmung mittels WDVS (a), bei Verwendung von wassersaugenden und damit feuchtebeladenen Standard-Sockelelementen (b) und durch Verwendung der im Projekt entwickelten THELMA-Bauelemente (c)

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 Wärme-

dämmung können deshalb nur durch neuartige, weitgehend monolithische Bauelemente gemacht werden. Dies erfordert eine grundlagenorientierte Betrachtung der Wärmetransportmechanismen bei gleichzeitiger Analyse der Mechanismen der Festigkeitsbildung in Beton.

Zielsetzung der nachfolgend beschriebenen Arbeiten war es daher, 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 rezyklierbar sind und darüber hinaus eine hohe statische Tragwirkung aufweisen. Hierzu wurden drei sich ergänzende Ansätze verfolgt:

Der erste Entwicklungsansatz bestand darin, durch grundlagenphysikalische Untersuchungen zu den Wärmetransportmechanismen in mikro- und nanoporösen, weitgehend amorphen Materialien wie Zementstein und Beton die Dämmwirkung dieser Baustoffe signifikant zu verbessern. Hierbei wurde der Ansatz verfolgt, die Wärmedämmeigenschaften der den Zementstein bildenden Mineralphasen zu steigern.

Aufbauend auf dem so optimierten Zementstein wurde in einem nächsten Schritt die Wärmeleitfähigkeit der zu entwickelnden Betone durch die gezielte Einführung eines mikroskaligen Porensystems reduziert. Die zentrale Herausforderung bestand hierbei darin, den Einfluss des Porensystems auf die Wärmedämmwirkung zu maximieren und gleichzeitig dessen Einfluss auf die Tragwirkung zu minimieren. Weiterhin musste das so erzeugte Porensystem eine möglichst minimale Kapillarwirkung aufweisen, um die unerwünschte Feuchteaufnahme zu verhindern.

Das letzte Entwicklungsziel bestand in der Entwicklung eines hochwärmedämmenden Bauelements aus den zuvor beschriebenen Wärmedämmbetonen mit integrierten Wärmedämmkammern.

2 Entwicklung von Betonen mit hoher Dämmwirkung und Tragfähigkeit

Wärmeleitung ist in festen Stoffen immer vorhanden, sobald sie einem Temperaturgradienten über den Querschnitt unterliegen. Bei Temperaturen größer als 0 K schwingen Atome um ihre Ruhelage. Die bosonischen Quasiteilchen, die Wärmeenergie über Gitterschwingungen übertragen, werden als Phononen bezeichnet [3]. Die Geschwindigkeit des Phononentransports – und damit die Wärmeleitung – steigen mit zunehmender Temperatur. Die Wärmeleitung lässt sich dabei als wellenartige Ausbreitung der Schwingung in einem Material veranschaulichen. Diese Schwingungen werden jedoch an atomaren Unregelmäßigkeiten im Werkstoffaufbau gestreut, wodurch die Wärmeleitung signifikant abnimmt [4]. Zielsetzung des ersten Entwicklungsschritts war es, den Phononentransport in der Zementsteinmatrix gezielt zu beeinflussen und so die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren. Details zu diesem Verfahren können zu diesem Zeitpunkt aufgrund patentrechtlicher Aspekte nicht vorgestellt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Ansätze geprüft, die Phononenstreuung und damit die Wärmeleitfähigkeit zu beeinflussen. Hierzu wurden kleinstskalige Proben hergestellt und mit Hilfe der in Bild 2 dargestellten Laser-Flash-Methode im Alter von 14 und 28 Tagen auf ihre Temperaturleitfähigkeit hin geprüft.

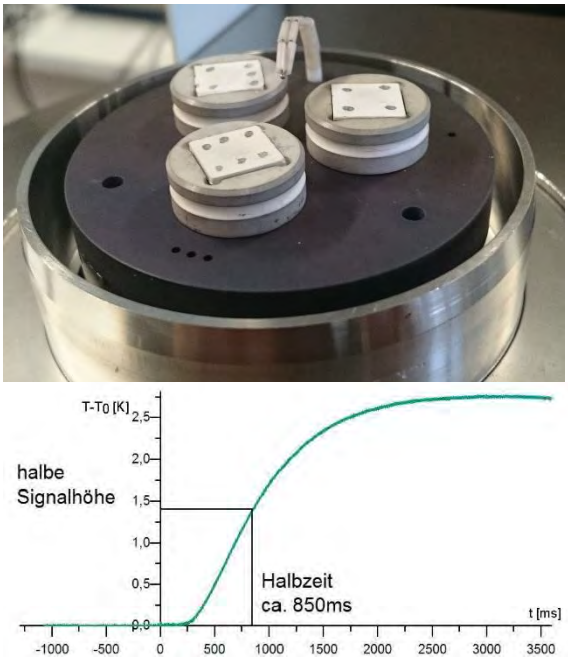


Bild 2 Proben im Laser-Flash-Probenhalter (oben) und Verlauf der Temperatur auf der Probenoberseite nach Laserbeschuss der Unterseite zum Zeitpunkt t = 0 s (unten)

Bei der Laser-Flash-Methode werden temperierte Prüfkörper mit einem Laserstrahl einseitig erwärmt. Mithilfe eines Infrarotdetektors wird die zeitliche Temperaturentwicklung auf der gegenüberliegenden Prüfkörperseite gemessen. Daraus lässt sich die Temperaturleitfähigkeit berechnen. Die Wärmeleit-

fähigkeit ergibt sich wiederum als Produkt der Temperaturleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Rohdichte des Materials. Für die Durchführung derartiger Messungen an Zementstein musste im Rahmen des Projekts ein eigenes Verfahren entwickelt werden.

Zusätzlich zu den Messungen der Temperaturleitfähigkeit wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit des Zementsteins in Anlehnung an DIN EN 196-1 an Prismen mit den Abmessungen 20 × 20 × 80 [mm] im Alter von 7, 14 und 28 Tagen bestimmt. An den Bruchstücken wurde die Porengrößenverteilung mittels der Quecksilberdruckporosimetrie nach DIN EN 66133 gemessen. Zusätzlich wurden die Verarbeitbarkeit des Zementleims und die Hydratationswärmeentwicklung bewertet.

Die Ergebnisse der Laser-Flash-Messungen sind in Bild 3 bezogen auf die Temperaturleitfähigkeit einer Zementsteinprobe aus reinem Portlandzement CEM I mit einem w/z-Wert von 0,5 dargestellt. Zwar weisen die Prüfkörper nach Ansatz I eine geringe Temperaturleitfähigkeit auf, aufgrund der aufwändigen und fehleranfälligen Herstellung und den geringen Festigkeitswerten wurde dieser Ansatz ebenso wie Ansatz II verworfen. Das größte Potential hinsichtlich der Steigerung des Verhältnisses von Druckfestigkeit zu Temperaturleitfähigkeit wurde für die Ansätze III und IV identifiziert. Dieses konnte durch Kombinationen beider Ansätze weiter gesteigert werden. Diese Kombinationen bildeten die Grundlage für die weitere Entwicklung des hochwärmedämmenden Leichtbetons.

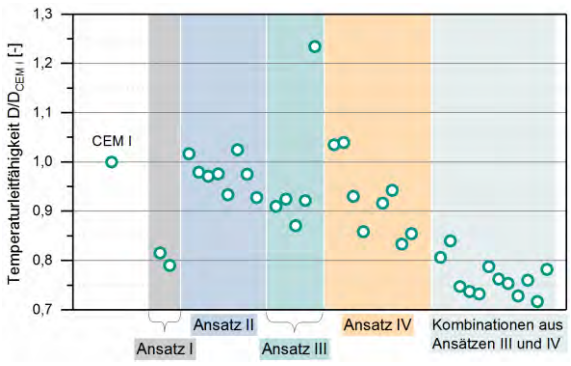


Bild 3 Temperaturleitfähigkeit von Zementstein für die einzelnen Ansätze zur Steuerung des Phononentransports bezogen auf die Temperaturleitfähigkeit von reinem CEM I

Parallel zu den Untersuchungen zur Beeinflussung des Phononentransports wurden in einem weiteren Schritt Untersuchungen zur gezielten Porosierung des Betons durch Zugabe schaumbildender Additive durchgeführt. Für die Wärmedämmung spielt dabei nicht nur die Porosität an sich eine Rolle, sondern vielmehr auch die Größenverteilung der eingebrachten Poren. Je geringer die Porengröße ist, desto günstiger wirkt sich dies auf die Wärmedämmwirkung des Baustoffes aus. Zur Porosierung der Zementsteinmatrix wurden fünf Luftporenbildner – zwei synthetische Tensideprodukte und drei Produkte auf natürlicher Wurzelharz-Basis – auf ihre porenbildende Wirkung hin untersucht. Bild 4 veranschaulicht ein Ergebnis der Untersuchungen.

Es zeigte sich, dass die synthetischen Luftporenbildner bezüglich der Menge und Größenverteilung der erzeugten Luftporen in der Zementsteinmatrix eine erheblich bessere Bilanz aufwiesen.

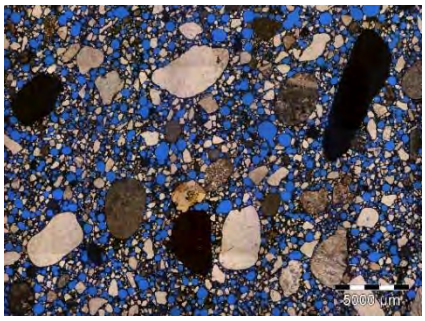


Bild 4 Porenverteilung (blau eingefärbt) eines Betons mit einem der untersuchten Luftporenbildner

In einem nächsten Schritt wurden vier Fließmittel aus zwei unterschiedlichen Wirkungsgruppen auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Die Komponente »Fließmittel« in der Additivkombination sollte eine Reduktion des Wassergehaltes im Frischbeton und damit eine Steigerung der Zementsteinfestigkeit erwirken. Um ein späteres Saugverhalten des Bauelements zu unterbinden, wurde zudem der Einfluss unterschiedlicher Hydrophobierungsmittel auf das Saugverhalten von Zementsteinen untersucht und das leistungsfähigste Produkt ausgewählt. Schließlich spielte für eine großtechnisch umsetzbare Rezeptur die Stabilität des inneren Gefüges des Frischbetons eine entscheidende Rolle. Durch Ergänzung des Additivcompounds um ein stabilisierendes Zusatzmittel konnte eine gleichmäßige Qualität über den gesamten Bauteilquerschnitt speziell bei Fertigteilen schnell und zielsicher erreicht werden.

Durch Kombination des so entwickelten Zusatzmittelcompounds und der entwickelten Methoden zur Steuerung des Phonentransports wurden in einem nächsten Schritt verschiedene Leichtbetone entwickelt. Dabei wurden der Zementgehalt, der Wasserzementwert, die Zementart, die Sieblinie sowie die Art und Festigkeit der leichten Gesteinskörnung anhand des Verhältnisses der Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-5 zur Trockenrohdichte festgelegt.

Die Charakterisierung der Betone erfolgte anhand der Würfeldruckfestigkeit und der Wärmeleitfähigkeit. Gleichzeitig wurde sichergestellt, dass aufgrund der Verwendung eines Massenhydrophobierungsmittels die kapillare Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 15148 den Grenzwert von 0,5 kg/(m²·h^{0,5}) nicht überstieg.
Die Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten wurden nach DIN EN 12667 in einem Plattenmessgerät an einzeln geschalten Betonplatten mit den Abmessungen 150 × 150 × 70 [mm] bei 10 °C und 15 K Temperaturdifferenz gemessen. Zur Vermeidung von Kondenswasser wurden die Prüfkörper einlagig in PE-Folie versiegelt. Auf Ausgleichsmatten konnte aufgrund der Ebenheit der geschalten Oberflächen verzichtet werden.
Die Ergebnisse der mittleren Würfeldruckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten im Alter von 28 Tagen für die vier kombinierten Ansätze sind in Bild 5 dargestellt. Die Kombination K4 weist den niedrigsten Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und das beste Verhältnis von Wärmeleitfähigkeitkoeffizient zu Würfeldruckfestigkeit auf.

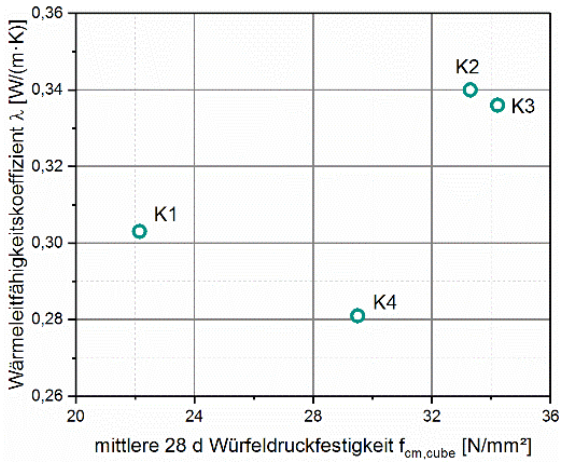


Bild 5 Mittlere Wärmeleitfähigkeit und mittlere Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen für die einzelnen Leichtbetonansätze

3 Entwicklung von hochwärmedämmenden, tragfähigen und nicht-saugenden Mauersteinen

Aufbauend auf den zuvor entwickelten Wärmedämmbetonen wurden abschließend mit den zuvor bestimmten Materialeigenschaften numerische Untersuchungen zur Festlegung der Geometrie der zu entwickelnden Wärmedämmsteine durchgeführt. Zum einen wurde dazu das Lastabtragungsverhalten der Steine und zum anderen die Wärmeleitung im Stein überprüft (siehe Bild 6).

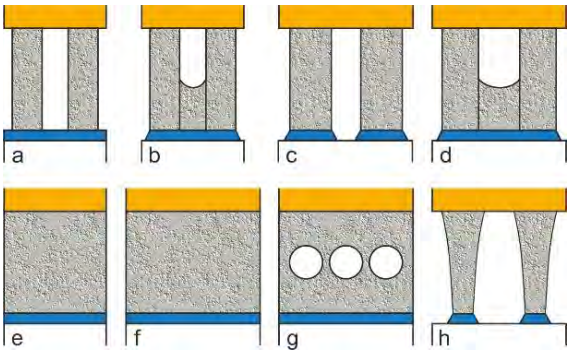


Bild 6 Untersuchte Bauteilgeometrien zur statischen und bauphysikalischen Bemessung

Das so entwickelte Wärmedämmelement besteht aus drei Komponenten: Tragstreifen aus Leichtbeton, Dämmstreifen aus Polystyrol und einer Lasteinleitungsplatte aus Hochleistungsbeton (Bild 6 (b)). Die Tragstreifen im Wandfußpunkt ermöglichen die Anordnung der Wärmedämmung. Die Tragstreifen führen zu einer konzentrierten Lasteinleitung im darüberliegenden Kalksandsteinmauerwerk. Die Lasteinleitungsplatte auf den Dämmstreifen bewirkt die flächige Lastverteilung über den Gesamtquerschnitt der Wand.
Aufgrund der Inhomogenität des Elementes ist der Wärmestrom sowohl für die senkrechte als auch die horizontale Richtung zu betrachten. Hierzu wurde das Element mit der FEM-Software Comsol simuliert. Die Ränder senkrecht zum Wärmestrom wurden adiabat angesetzt. Die Temperaturverteilung sowie die Wärmestromlinien für beide Stromrichtungen sind in Bild 7 dargestellt.
Zur Einschätzung der thermischen Qualität wurde die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Elementes aus dem durch die FEM-Berechnung ermittelten Wärmestrom zunächst getrennt in horizontaler und vertikaler Richtung simuliert. Anschließend wurde daraus eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} berechnet. Eine Parameterstudie ergab, dass bei typischen Anwendungsfällen im ungünstigsten Fall folgendes Verhältnis vorliegt:

$$\lambda_{eq} = 0{,}9 \cdot \lambda_{eq,vertikal} + 0{,}1 \cdot \lambda_{eq,horizontal}$$

Dieser Ansatz wird für die Beschreibung der thermischen Qualität des Elementes angesetzt.
Mit den oben genannten Randbedingungen ergibt sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von λ_{eq} = 0,20 W/(m·K). Im Vergleich zum Vorgängerbaustein, dem Bauteil Schöck Novomur®, bedeutet

dies eine Verbesserung der Wärmedämmwirkung des Elementes um mehr als 20 %.

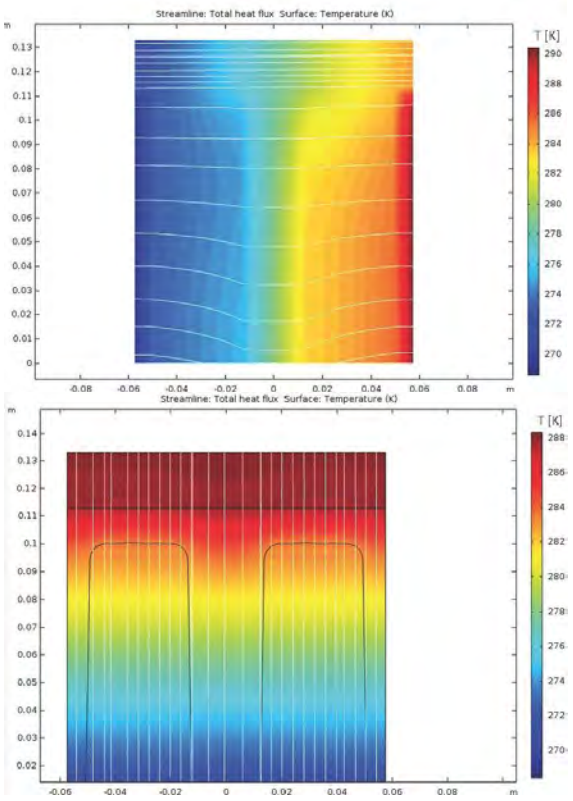


Bild 7 Querschnitt durch Elementmitte: Wärmestromlinien und Temperaturverteilung bei horizontalem (oben) und vertikalem (unten) Wärmestrom

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein zentrales Element intelligenter Gebäudetechnik sind Bauelemente, die eine hohe Wärmedämmung bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit aufweisen und durch ihre bauphysikalischen Eigenschaften einer Durchfeuchtung des Bauteils und einer daraus resultierenden Schimmelbildung entgegenwirken. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Sockelbereich von Gebäuden – d. h. der Bereich unmittelbar über der Boden- bzw. Kellerplatte eines Bauwerks. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse im Bereich dieser Bauteile müssen diese eine weit über die eines normalen Wandbauteils hinausgehende Dämmwirkung aufweisen. Zielsetzung des hier vorgestellten Projekts war es daher, vorgefertigte, hochwärmedämmende und nicht feuchtesaugende, thermisch wirksame Bauelemente für das Mauerwerk aus hochwärmedämmendem Leichtbeton zu entwickeln.

Hierzu wurde im Projekt ein grundlagenorientierter Ansatz verfolgt, in dem zunächst das Wärmetransportverhalten in Beton auf der Mikrostrukturebene durch mineralogische Veränderungen signifikant verbessert wurde. Aufbauend darauf wurde eine gezielte, in ihrer Struktur definierte und reproduzierbare Porosierung der Zementsteinmatrix vorgenommen, durch die die Wärmeleitfähigkeit von Beton weiter reduziert werden konnte. Auf der Grundlage der so entwickelten Betone wurden dann neuartige Bauteile entworfen, deren Wärmeleitung durch Einbau zusätzlicher Wärmedämmkammern weiter reduziert wurde. Abschließend werden derzeit geeignete Fertigungstechniken entwickelt, die eine Übertragung der im Labor erzielten Techniken der Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit, der Porosierung und der Bauteilfertigung auf eine großtechnische Produktion erlauben.

Die bislang vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass es durch die Kombination der hier gewählten Ansätze – Phonentransportsteuerung, Porosierung, Hydrophobierung und Bauteiladaption – gelingt, die Wärmedämmwirkung von Sockelbausteinen erheblich gegenüber bestehenden Ansätzen zu verbessern.

Literaturverzeichnis

[1] Umweltbundesamt (UBA): Energieverbrauch privater Haushalte. https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte, 11/2017

[2] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV 2016)

[3] Gross, R., Marx, A.: Festkörperphysik. Berlin, Boston, Mass.: De Gruyter 2014

[4] Schilling, F.: Petrophysik: Ein mineralogischer Ansatz. Habilitationsschrift. Berlin 1998

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projekts unter den Förderkennzeichen 13N13281 bis 13N13284.

Impressum

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb)
Budapester Straße 31
10787 Berlin
info@dafstb.de
www.dafstb.de
Dr.-Ing. Udo Wiens

Herzlichen Dank
Fördergeber: **Bundesministerium für Bildung und Forschung**
Projektträger: **VDI Technologiezentrum**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0082-1
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0086-9

1. Auflage 600 Exemplare

Stand: Dezember 2017

Redaktion: Mirsada Omercic | DAfStb
Ulrike Wachtendorf | DAfStb
Dr.-Ing. Kenji Reichling | DAfStb

Umschlaggestaltung: Sabine Paulischkis | DAfStb

Herstellung | Innengestaltung: Gabriele Wicker | Fraunhofer IRB
Druck und Bindung: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten
Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2018
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500
Telefax +49 711 970-2508
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

Organisation
WiTraBau–
Wissenstransfer im Bauwesen

Projektkoordination
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.

ISBN 978-3-7388-0082-1