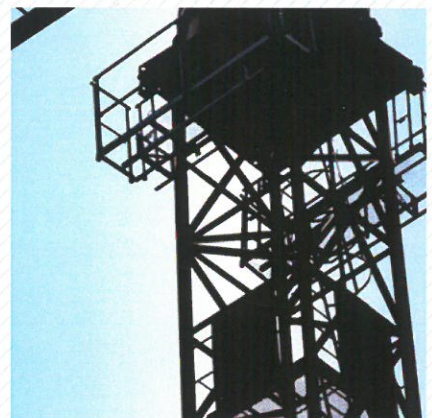




DAS  
BAYERISCHE  
BAUWERBE

# HOCHSCHULPREIS

## des Bayerischen Baugewerbes



Wettbewerbsbeiträge **2016**

# IMPRESSUM

## Herausgeber

Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe  
Bavariaring 31 | 80336 München  
Telefon +49 89 76 79 - 0 Telefax +49 89 76 79 - 154

info@lbb-bayern.de | [www.lbb-bayern.de](http://www.lbb-bayern.de)

## Mit Beiträgen von

Moritz Budde • Andreas Fraundorfer • Jan Goebel • Kai Hofmann • Michael Jauchmann •  
Simon Kaiser • Franz Mathe • Julia Osterried • Simon Rumplmayr

## Redaktion

RA Andreas Demharter (verantwortlich)

## Gestaltungskonzept, Layout und Realisation

Landesverband Bayerischer Bauinnungen  
Bavariaring 31 | 80336 München  
Telefon +49 89 76 79 - 0 Telefax +49 89 76 79 - 154

info@lbb-bayern.de | [www.lbb-bayern.de](http://www.lbb-bayern.de)

## Bildquellen

Autoren, falls nicht abweichende Angabe am jeweiligen Bild

## Druck

Druck + Verlag Ernst Vögel GmbH Kalvarienbergstraße 22 | 93491 Stamsried [www.voegel.com](http://www.voegel.com)

München, April 2016



Zum achten Mal zeichnete Franz-Xaver Peteranderl, Präsident der Bayerischen Baugewerbeverbände im Oskar von Miller Forum in München exzellente Bachelor- und Masterarbeiten der Technischen Universität München, der Technischen Hochschulen und der Bayerischen Hochschulen für angewandte Wissenschaften aus.

In diesem Jahr wurden insgesamt 9 Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Hochschule für angewandte Wissenschaften in München,
- der Hochschule Augsburg,
- der Hochschule Coburg,
- der Technischen Hochschule Nürnberg - Georg Simon Ohm und
- der Technischen Universität München

eingereicht. Aus den 9 Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss unter Vorsitz von Herrn Prof. Dr. Ing. Niels Oberbeck entschieden, 5 Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde und 3 Arbeiten mit einem Geldpreis auszuzeichnen.



Der Gewinner des 1. Preises: Kai Hofmann

### 1. Preis, 3.000 Euro Kai Hofmann

Mit dem 1. Preis wurde Kai Hofmann für seine Bachelorarbeit an der Hochschule Coburg zum Thema „Schubkraftübertragung mit Zahnleisten zwischen modularen Bauteilen in Stahlbeton“ ausgezeichnet. Die Bachelorarbeit hatte zur Aufgabe, für modulare Fachwerkträger aus Stahlbeton Varianten zur Schubkraftübertragung in den Knotenpunkten zu untersuchen und vergleichend gegenüber zu stellen.

Alle Betrachtungen basierten auf einer Schubkraft von 800 kN zwischen den Stäben aus hochfestem Beton C100/115 und ultrahochfestem Beton mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck}$  von 160 N/mm<sup>2</sup>. Neben der Minimierung der Verzahnungslänge ist für dieses Bauteil auch die Möglichkeit des Toleranzausgleichs von großer Bedeutung.



Als effektivste Kraftübertragung hat sich dabei eine Stahl-Stahl-Zahnleiste mit einer trockenen Fuge erwiesen. Neben der modularen Fügung ist auch der zerstörungsfreie Rückbau ein besonderer Vorteil dieser Konstruktion. Über einen interaktiven Prozess mit Hilfe des FE-Programms SOFiSTiK wird die minimale Verzahnungslänge ermittelt. Mit einer Zahnhöhe von 15 mm ist eine Verzahnungslänge von 308 mm erforderlich.

Der Wettbewerbsausschuss würdigt Kai Hofmann damit für seine herausragende, technisch-wissenschaftliche Arbeitsweise und den gelungenen Stil der Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit sowohl in der Zusammenfassung als auch in der Bachelorarbeit.

Kai Hofmann ist es gelungen, seine Ergebnisse anschaulich, verständlich und auf den Nutzen bringenden Kern reduziert darzustellen.

## 2. Preis, 2.000 Euro

### Simon Rumplmayr

Den 2. Preis erhielt Herr Simon Rumplmayr für seine Masterarbeit zum Thema „Verlauf des Phasenbestandes und der Carbonatisierungsfront zementgebundener Baustoffe unter verschiedener CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung“.

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen unter Betreuung von Dr. rer. nat. Hilbig und Frau Dipl.-Ing. Charlotte Thiel und beschäftigt sich mit dem grundlegenden Problem der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton durch Korrosionsschutz der Bewehrung. Sie nähert sich dem Problem von der chemischen bzw. betontechnologischen Seite, indem

sie untersucht, wie sich erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Betongefüge, die Mikrostruktur und den Phasenbestand des umgebenden Betons auswirken.

Die Untersuchungen erweitern das Verständnis der Carbonatisierung. Langfristiges Ziel ist es, Schnellprüfverfahren mit Hilfe von erhöhten CO<sub>2</sub>-Beaufschlagungen zu entwickeln, mit denen Aussagen über den noch bestehenden Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl und damit die Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen getroffen werden können. Für die Arbeit waren umfangreiche interdisziplinäre, messtechnische und chemische Kenntnisse und Fähigkeiten erforderlich.

## 3. Preis, 1.000 Euro

### Andreas Fraundorfer

Der 3. Preis ging an Andreas Fraundorfer für seine Masterarbeit „Untersuchung der Schutzwirkung eines KKS-Systems bei chloridbelasteten Trennrissen und Zwischendecken“.



Die drei prämierten Teilnehmer 2016:

Simon Rumplmayr (2. Preis), Kai Hofmann (1. Preis) und Andreas Fraundorfer (3. Preis)

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule München unter Betreuung von

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt. Herr Fraundorfer beschäftigte sich in seiner Arbeit

mit der technischen Optimierung des kathodischen Korrosionsschutzes. Dabei wird das elektrostatische Prinzip verwendet, das Elektronen von der Anode zur Kathode wandern. Dadurch kann beim Anbringen einer entsprechenden Gleichspannung die Umgebung der Bewehrung mit Elektronen so übersättigt werden, dass Stahlkorrosion unterbunden werden kann.

Nach Einschätzung des Wettbewerbsausschusses ist die Technologie durchaus marktreif, es besteht jedoch noch Optimierungsbedarf. Hierzu hat Herr Fraundorfer einen wertvollen Beitrag mit seiner Arbeit geleistet, indem er zur Optimierung der Kosten und des Bauablaufs untersucht hat, welche Auswirkungen sich für den Kathodenschutz ergeben, wenn die Anode auf der Deckenoberseite angebracht wird.

Der Wettbewerbsausschuss würdigte mit der Vergabe des 3. Preises das umfangreiche interdisziplinäre Wissen auf dem Feld der Mess- und Elektrotechnik über die typischen Fähigkeiten und Kenntnisse eines Bauingenieures hinaus.

### **Auszeichnungen mit einer Teilnahmeurkunde**

Mit einer Teilnahmeurkunde und einem Gutschein über 100 Euro für einen Kurs bei der Bayerischen BauAkademie wurden ausgezeichnet:

- Moritz Budde für seine Bachelorarbeit an der Hochschule München: „Mikrorissbildung im hochfesten Beton durch Verwendung verschiedener Zusatzstoffe“. Die Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen auf die Mikrorissbildung bei unterschiedlichen Dosierungen der Zuschlagstoffe Silikastaub, Metakaolin und Kalksteinmehl.
- Jan Goebel für seine Bachelorarbeit an der Hochschule München: „Digitale Baustelle - Untersuchung über die Einarbeitung einer Baudatenerfassungssoftware in ein mittelständisches Bauunternehmen“. Die Arbeit befasst sich mit der Auswahl und Implementierung eines digitalen Zeiterfassungssystems in einem mittelständischen Bauunternehmen und ist ein typisches Beispiel für die Durchdringung des Baugewerbes durch digitale Anwendungen im Sinne des Building Information Managements. Auf der Grundlage dieser Arbeit berät Herr Goebel bereits baugewerbliche Unternehmen bei der Einführung digitaler Zeiterfassungssysteme.
- Michael Jauchmann für seine Bachelorarbeit an der Hochschule Augsburg: „Bauleitung in Hochbau und Haustechnik: Probleme und Lösungsansätze anhand von Praxisbeispielen“. Die Bachelorarbeit beschäftigt sich auf der Grundlage von Interviews mit der Frage, warum es zu Planungsdefiziten und Fehlern kommt und ob dreidimensionale Planungen und Building Information Management zur Verbesserung beitragen können. Herr Jauchmann kommt zu dem Ergebnis, dass in den Planungsbüros derzeit noch wenige Anreize gegeben sind, die technischen Möglichkeiten der

Softwareprodukte vollständig zu nutzen. Er geht davon aus, dass ohne staatliche Zwänge in absehbarer Zeit keine nennenswerten Sprünge im Sinne des Building Information Managements zu erwarten sind.

- Franz Mathe für seine Masterarbeit an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm: „Aktive thermografische Untersuchungen an Elementwänden aus Beton“. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung der Randbedingungen für thermografische Aufnahmen an Elementwänden. Das Ziel ist es zukünftig mit Thermografie Leckagen an Elementwänden aufzuspüren. Ein solches Verfahren wäre für das Baugewerbe von großem Interesse.
- Julia Osterried für ihre Masterarbeit an der TU München: „Analyse der Kostenstruktur von Bauleistungen“. In der Masterarbeit werden Grundlagen für Bauunternehmen erarbeitet, die es erlauben, fundierte Entscheidungen zu treffen, ob es sinnvoll ist, eigenes Personal oder Maschinen zu betätigen oder die Leistung an Subunternehmer zu vergeben. Die Arbeit bietet auch Ansatzpunkte, um Kostentreiber im Unternehmen zu identifizieren und kostenminimierende Maßnahmen zu erarbeiten und umzusetzen.



Von links:

Kai Hofmann, Michael Jauchmann, Franz Mathe, Simon Rumplmayr, Jan Goebel, Julia Osterried, Moritz Budde, Andreas Fraundorfer

**Fachkolloquium zum Thema „Der Polier - Taktgeber einer digitalisierten Bau Supply Chain?“**

Prof. Dr. Michael Krupp, Forschungsgruppe Optimierung und Operations Management an der Hochschule Augsburg und fachlicher Beirat der Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS referierte über die Erfahrungen aus seiner Forschungsarbeit. Unter der Fragestellung „Der Polier - Taktgeber digitalisierten Bau Supply Chain?“ warf der Logistikexperte einen Blick von außen auf die Wertschöpfungs- und Lieferkette der kleinen und mittelständischen Betriebe des

Baugewerbes. Im Zuge der Digitalisierung der Bauwirtschaft werden sich für die baugewerblichen Betriebe und deren Lieferanten Optimierungspotenziale durch die Vermeidung von Medienbrüchen der Informationen und Verringerung der Transportaktivitäten ergeben. In einem Forschungsvorhaben sollen hierfür geeignete Prozesse identifiziert sowie die notwendige Software und zugehörige Trainingsprogramme entwickelt werden. Wichtig dabei ist, dass für die Anwender sofort ein Mehrwert der digitalisierten Prozesse spürbar wird.





## Inhaltsverzeichnis

Mikrorissbildung im hochfesten Beton durch Verwendung verschiedener Zusatzstoffe Budde Moritz, Bachelorarbeit, Hochschule München	Seite 9
Untersuchung der Schutzwirkung eines KKS-Systems bei chloridbelasteten Trennrissen in Zwischendecken Fraundorfer Andreas, Masterarbeit, Hochschule München	Seite 17
"Digitale Baustelle" Untersuchung über die Einarbeitung einer Baudatensoftware in ein mittelständisches Bauunternehmen Goebel Jan, Bachelorarbeit, Hochschule München	Seite 25
Schubkraftübertragung mit Zahnleisten zwischen modularen Bauteilen in Stahlbeton Hofmann Kai, Bachelorarbeit, Hochschule Coburg	Seite 31
Bauleitung in Hochbau und Haustechnik: Probleme und Lösungsansätze anhand von Praxisbeispielen Jauchmann Michael, Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg	Seite 37
Aktive thermografische Untersuchungen an Elementwänden aus Beton Mathe Franz, Masterarbeit, Technische Hochschule Nürnberg - Georg Simon Ohm	Seite 43
Analyse der Kostenstruktur von Bauleistungen Osterried Julia, Masterarbeit, TU München	Seite 49
Verlauf des Phasenbestands und der Carbonatisierungsfront zementgebundener Baustoffe unter verschiedener CO <sub>2</sub> -Beaufschlagung Rumplmayr Simon, Masterarbeit, TU München	Seite 55



## **Autor**

Moritz Maximilian Budde

Okt. 2015 – Heute:	Technische Universität München; Bauingenieurwesen, Master
Okt. 2011 – Sep. 2015:	Hochschule München; Bauingenieurwesen, Bachelor, Duales – Studium
Aug. 2011 – Juli 2014:	Franz Kassecker GmbH; Ausbildung, Beton- und Stahlbetonbauer
Sep. 2009 – Juli 2011:	Samuel – Heinicke – FOS München; „Technik“, Fachabitur
Sep. 2007 – Aug. 2009:	Samuel – Heinicke – Realschule München, „Technik“, Mittlere Reife

## **Betreuer**

Die Bachelorarbeit wurde an der Technischen Hochschule München in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens an der Universität der Bundeswehr in München, angefertigt. Betreut wurde meine Arbeit von Frau Prof. Dr. Dipl. – Ing. Andrea Kustermann.

# MIKRORISSBILDUNG IM HOCHFESTEN BETON DURCH VERWENDUNG VERSCHIEDENER ZUSATZSTOFFE

## Bachelorarbeit

*Moritz Maximilian, Budde*

**Bereits im unbelasteten Beton sind aufgrund des unterschiedlichen Verformungsverhaltens der einzelnen Komponenten Mikrorisse vorhanden. Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde das Verhalten der Mikrorissbildung unter Verwendung unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzungen untersucht. Die Bildung von Mikrorissen wurde an Probekörper aus hochfesten Beton, durch Verwendung von Silikastaub, Metakaolin, Kalksteinmehl und durch unterschiedliche Dosierung, 30 % und 10 %, von calciniertem Ton, untersucht. Als Haupteinfluss auf die Mikrorissbildung zeigte sich zum einen die Hydratationswärme und zum anderen, bezogen auf die maximale Mikrorissanzahl, die Verwendung der Zusatzstoffe calcinierter Ton und Silikastaub des hochfesten Betons. Ausgangspunkt der Mikrorisse in der Mörtelmatrix sind Luftporen bzw. die Kontaktzone zur Gesteinskörnung. Der Einfluss vorhandener Mikrorisse auf die Festbetoneigenschaften des Betons zeigte sich, in den hier durchgeführten Festbetonprüfungen am hochfesten Beton, nicht eindeutig.**

**Keywords:** Hochfester Beton, Mikrorisse, Silikastaub, Kalksteinmehl, calcinierter Ton, Metakaolin

## Fragestellung und Vorgehensweise

Im Rahmen der Literaturlauswertung zeigt sich Einklang in der Tatsache dass im normalfesten Beton und auch im hochfesten Beton Mikrorisse bereits vor der Belastung existieren.

Als Hauptursache werden Schwinden und unterschiedliches Verformungsverhalten der Einzelkomponenten genannt. In welchem Maße die Mikrorissbildung durch verschiedene

Parameter beeinflusst werden kann, ist nicht hinreichend untersucht.

Die Gefügespannungen im Beton, die sich durch unterschiedliches Verhalten der Komponenten ergeben, werden mittels der Variation des Größtkorns und der Kornform als Ursache für die Bildung von Mikrorissen untersucht. Offen bleibt ebenso der Einfluss der Hydratationswärme und des Schwindens auf die Mikrorissbildung. Die Bildung von Mikrorissen, wie auch die Festbetoneigenschaften, werden mit den

Parametern der unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzung verifiziert.

Die Rissentwicklung im Beton unter äußerer Last wurde in der Literatur vielfach untersucht. Ebenso die Entwicklung der Mikrorisse unter Belastung getrennt nach deren Ort des Auftretens im Gesteinskorn, in der Kontaktzone und in der Matrix. Im Rahmen der Bachelorarbeit wird die Frage, inwiefern die vorhandenen Mikrorisse Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften des Betons Einfluss nehmen, behandelt.

Zusätzlich soll auch das Verhalten der Mikrorisskennwerte in Abhängigkeit der Hydratationstemperatur untersucht werden. All diese Parameter werden unter Veränderung der Bindemittelzusammensetzung untersucht und verglichen, um unter anderem die Mikrorissanzahl durch Verwendung von unterschiedlichen Zusatzstoffen zu reduzieren.

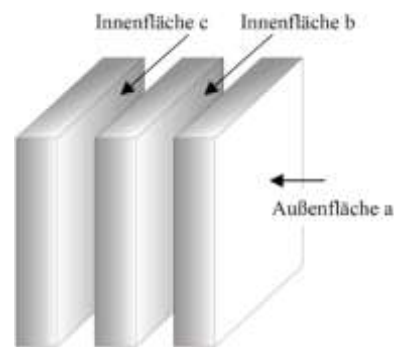
Die Vielzahl der Möglichkeiten Mikrorisse im Beton zu identifizieren bzw. sichtbar zu machen weisen alle ihre Vor- und Nachteile auf. Im Rahmen der Arbeit ist ein Visualisierungs- und Auswerteverfahren angewendet worden das für die hier untersuchten Aspekte am sinnvollsten erschien und einen großen Informationsgehalt bietet.

## Probenvorbereitung

Als Prüfkörper werden Würfel mit einer Kantenlänge von  $10\text{ cm}$  gewählt. Die Oberfläche der zu untersuchenden Probe beträgt damit  $10 * 10\text{ cm}$ , was einen angemessenen Ausschnitt aus dem

Beton darstellt. Die Probekörper werden nach  $24\text{ h}$  ausgeschalt und anschließend  $28\text{ d}$  unter Wasser gelagert.

Die Prüfkörper werden anschließend mit einer Nassschneidemaschine in drei gleich große Quader geschnitten (Abb. 1). Dadurch ergeben sich Probekörper die einmal die Innenfläche (b. und c.) und die Außenfläche (a.), welche die angrenzende Fläche zur Schalung wiedergibt, dargestellt.



**Abb. 1: Schematische Darstellung eines in drei Quader gesägten Probekörpers für die Mikrorissuntersuchung [1]**

Die Innenflächen des zersägten Probekörpers werden anschließend mit einer Nassschleifmaschine geschliffen, siehe (Abb. 2 links). Anschließend werden die Quader zum Trocknen für einen Tag bei Raumtemperatur senkrecht zum Trocknen gelagert.

Um die Probekörper schonend zu trocknen, werden Sie gemeinsam für sechs Tage luftdicht im Exsikkator über Silikagel (Abb. 2 rechts) verschlossen. Dies hat zur Folge dass dem Probekörper in den oberflächennahen Rissen und Poren die enthaltene Feuchtigkeit entzogen wird.





**Abb. 2: Innenfläche eines Mikrorissprobekörpers beim Abschleifen in der Nassschleifmaschine (links); Trocknung der geschliffenen Mikrorissprobekörper im Exsikkator über Silikagel (rechts) [1]**

Nach dem Trocknen werden die Prüfkörper samt einem kleinen Überstand linksrum mit Klebeband abgeklebt, damit die Prüffläche mit grün eingefärbten Zweikomponenten Gießharz (Harz und Härter) eingegossen werden kann (Abb. 3).



**Abb. 3: Vergießen der Mikrorissprobekörper mit eingefärbtem Gießharz (links), vergossener Mikrorissprobekörper bei der Trocknung (rechts) [1]**

## Ergebnisse der Mikrorissuntersuchung

Zur Vereinfachung werden in den folgenden Kapiteln für die einzelnen Mischungen folgende Abkürzungen verwendet:

- A → CEM I 42,5 R mit 30 % calciniertem Ton
- B → CEM I 42,5 R mit 10 % calciniertem Ton
- C → CEM I 42,5 R mit 10 % Metakaolin
- D → CEM I 42,5 R mit 10 % Kalksteinmehl
- E → CEM I 42,5 R mit 10 % Silikastaub

Die Mischungen C und D weisen im Verhältnis zu den Mischungen A, B und E gerade mal nur die Hälfte der Mikrorissanzahl auf. Die meisten Mikrorisse mit 139 Stück weist die Mischung E auf, während die beiden Mischungen C und D

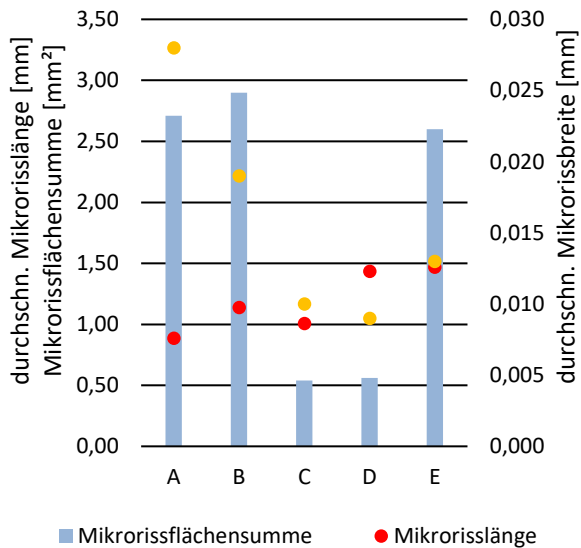
am wenigsten Mikrorisse mit einmal 62 und 63 Stück enthalten. Bei den Mischungen A und B, enthält die Mischung A eine geringere Anzahl mit 111 Stück, als die der Mischung B mit 138 Stück.

Die Mikrorissflächensumme verhält sich, wie in (Abb. 4) zu erkennen, analog zur Mikrorissanzahl. Die Mischungen A und B weisen die größten und nahezu gleiche Mikrorissflächensumme auf. Die Mischung A besitzt eine Mikrorissflächensumme von  $2,71 \text{ mm}^2$  während die Mischung B eine Mikrorissflächensumme von  $2,90 \text{ mm}^2$  enthält.

Die geringsten und auch ebenfalls nahezu gleichen Mikrorissflächensummen weisen die beiden Mischungen C mit  $0,54 \text{ mm}^2$  und D mit  $0,56 \text{ mm}^2$  auf. Die Verwendung von Silikastaub wie in Mischung E besitzt eine ebenso große Mikrorissflächensumme von  $2,60 \text{ mm}^2$  wie die Mischungen im calcinierten Ton.

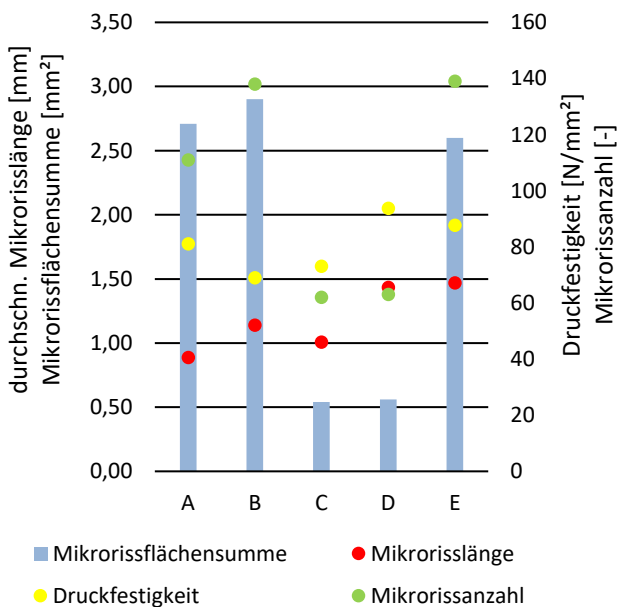
Die durchschnittliche Mikrorisslänge hält sich annähernd konstant ( $0,887 \text{ mm} - 1,469 \text{ mm}$ ), während die durchschnittliche Mikrorissbreite bei den Mischungen C, D und E relativ geringe Werte aufweist verglichen mit den beiden Mischungen A und B (Abb. 4).

Ebenfalls zeigt das Diagramm sehr anschaulich, dass es zwischen der Mikrorissflächensumme, der durchschnittlichen Mikrorisslänge und der durchschnittlichen Mikrorissbreite keinen direkten Zusammenhang gibt.



**Abb. 4: Mikrorissflächensumme, Mikrorissbreite und Mikrorisslänge der Mischungen mit unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung**

Um einen ausführlicheren Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der durchschnittlichen Mikrorisslänge zu erhalten, werden die jeweiligen Ergebnisse mit der Mikrorissanzahl und zusätzlich mit der Mikrorissflächensumme in (Abb. 5) verglichen.



**Abb. 5: Durchschnittliche Mikrorisslänge, Mikrorissanzahl, Mikrorissflächensumme und Druckfestigkeit der Mischungen unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzungen im Vergleich**

## Auswertung der Mikrorissuntersuchung

Bei der Verwendung von Silikastaub steigt vermutlich die Wahrscheinlichkeit zum autogenen Schwinden, was letztendlich die Mikrorissbildung verstärkt, vor allem im Rand bzw. im inneren Bereich des Probekörpers. Dies bestätigt ebenso die Untersuchung in [2], die hierfür den höheren Anteil an Silikastaub, bezogen auf den Bindemittelanteil, verantwortlich macht.

Es ist anzunehmen, dass der Zusatz von Kalksteinmehl und Metakaolin, auf Grund der hohen Mahlfineheit, zu einer erhöhten Verdichtung des Gefüges und somit zu einer Verringerung der entstehenden Mikrorissflächensumme und auch Mikrorissanzahl im Vergleich zu den Mischungen mit den Zusatzstoffen calciniertem Ton und Silikastaub führt. Die Zugspannungen werden von dichten und homogenen Gefüge besser verteilt als bei den anderen Zusatzstoffen. Bei den Mischungen A und B führt die Zugabe von 30 % calciniertem Ton zu einer geringeren Mikrorissanzahl und auch Mikrorissflächensumme verglichen mit der Zugabe von 10 % calciniertem Ton. Bei den Werten der durchschnittlichen Mikrorisslängen weist die Verwendung von 30 % calciniertem Ton eindeutig kürzere Risse als bei der Zugabe von 10 % calciniertem Ton auf.

Es ist anzunehmen, dass auf Grund von Inhomogenität es häufiger zu Spannungsspitzen kommt, welche für die Mikrorissbildung verantwortlich sind.

## Ausblick

Die Verwendung von unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen zeigt ein unterschiedliches Verhalten bei der Bildung von Mikrorissen im Beton. Der Inerte Zusatzstoff Kalksteinmehl erreichte bei allen Festbetonprüfungen, verglichen mit den puzzolanen Zusatzstoffen, die maximalen Werte. Bei den Mikrorisskennwerten weist Kalksteinmehl im Schnitt die geringeren Werte auf.

Die Auswirkungen der Mikrorisse auf die Festbetoneigenschaften sind bei den hier gemachten Versuchen gering. Hauptaugenmerk dieser Arbeit war die Untersuchung der unterschiedlichen

Bindemittelzusammensetzungen auf die Bildung von Mikrorissen. Die Auswirkungen auf die Festbetonkennwerte kommen mit den hier untersuchten hochfesten Betonen nicht ausreichend zum Tragen, da die Festbetonkennwerte zu wenig Unterschiede aufweisen, um eindeutige Aussagen treffen zu können.

Zur Ermittlung der Einflüsse von Mikrorissen im Beton auf die Festbeton- und Dauerhaftigkeitseigenschaften sind weitere Versuche notwendig. Weiterhin erscheint es sinnvoll, den Einfluss der Mikrorisse auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften wie Carbonatisierung und Frost-/ Taumittel – Widerstand näher zu untersuchen.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: A. Kustermann, Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge, Bd. 2, Bundeswehr Universität München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2005.
- [2]: F. S. Rostásy, Baustoffe, Stuttgart: W. Kohlhammer, 1983.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. G. König, N. V. Tue und M. Zink, Hochleistungsbeton. Bemessung, Herstellung und Anwendung, Ernst & Sohn, 2001.
2. U. Wiens, B. Meng und P. Fontana, „Mikrorissbildung im Hochleistungsbeton - Vom Modell zu den Auswirkungen auf Betoneigenschaften“, Beton, Nr. 7.
3. T. T. C. Hsu, F. Slate, G. Sturman und G. Winter, Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve., Bd. Vol. 60, Journal of the American Concrete Institute, 1963.
4. T. Richter, Hochfester Beton - Hochleistungsbeton, Düsseldorf: Bau + Technik GmbH, 1999.
5. N. Beuntner, Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementären Systemen, Bochum: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 7. / 8. November 2013.

**Die Arbeit wurde mit einer Teilnehmerurkunde ausgezeichnet.**



# UNTERSUCHUNG DER SCHUTZWIRKUNG EINES KKS-SYSTEMS BEI CHLORIDBELASTETEN TRENNRISSEN IN ZWISCHENDECKEN

## Masterarbeit

*Andreas Fraundorfer*

Als Alternative zu einer konventionellen Instandsetzung von Parkhäusern und Tiefgaragen hat sich das Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) bewährt. Besondere Vorteile aus Gründen der Kosten und des Bauablaufs ergeben sich, wenn das dafür notwendige Anodensystem bei Zwischendecken nur auf der Deckenoberseite appliziert werden muss. Der Nachweis, ob in diesem Fall bei chloridbelasteten Trennrissen in Zwischendecken ein ausreichender Schutz für die untere Bewehrungslage gegeben ist, stellt sich jedoch in der Praxis als sehr kompliziert heraus. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden dazu Stahlbetonprobekörper hergestellt. Darauf wurde ein KKS-System appliziert. Durch eine spezielle Messanordnung konnten zahlreiche Bewehrungskopplungen mit verschiedensten Treibspannungen und Feuchtezuständen der Probekörper untersucht werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die normativen Nachweiskriterien eines ausreichenden Schutzes der unteren Bewehrung für den Fall eines nur deckenoberseitig installierten KKS-Systems nicht geeignet sind. Dennoch war es möglich, einen ausreichenden Korrosionsschutz der Bewehrung über eine gezielte Strommessung im unteren Trennrissbereich nachzuweisen.

**Keywords:** KKS, Kathodischer Korrosionsschutz, Trennrisse, Schutz, Zwischendecken, Chloride

## 1. Einleitung

Der Chlorideintrag in Parkhäuser und Tiefgaragen aus Tausalrückständen führt zu immensen Instandsetzungskosten an der Stahlbetonkonstruktion. Speziell im Bereich von (Trenn-) Rissen findet der Chlorideintrag besonders schnell statt. Ist der Beton auf Höhe der Bewehrung mit einer kritischen Chloridkonzentration belastet, sind in der Regel aufwendige Instandsetzungsarbeiten erforderlich, um den Korrosionsschutz der Bewehrung wieder herzustellen. Bei einer konventionellen Instandsetzung von Trennrissen in Zwischendecken müssen beide Ebenen gesperrt werden. Nach umfangreichen

Abstützmaßnahmen wird der chloridbelastete Beton entfernt, evtl. nötige Bewehrung zugelegt und die Flächen wieder neu mit Beton ergänzt. Dies stellt einen starken Eingriff in die Bausubstanz dar und ist lärm- sowie meist sehr kostenintensiv. Eine Alternative zur herkömmlichen Instandsetzung stellt (bei ausreichendem Restquerschnitt des Betonstahls) die Installation eines Kathodischen-Korrosionsschutz-Systems (KKS) dar.

Ziel dieser Arbeit war festzustellen, ob prinzipiell ein Schutz der deckenunterseitigen Bewehrung im Trennrissbereich möglich ist, wenn das dafür notwendige Anodensystem nur auf der Deckenoberseite installiert wird. Dadurch kann

ein aufwendiger Einbau über Kopf vermieden werden und die Arbeiten können so getaktet werden, dass während der Instandsetzungsmaßnahme die Nutzung jeweils eines Geschosses aufrecht erhalten bleibt.

## 2. Kathodischer Korrosionsschutz

Beim KKS werden meist Bänder oder Gitter aus korrosionsbeständigem Material auf die Betonoberfläche appliziert und mit einem geeigneten, leitfähigen Mörtel eingebettet. Die Bänder und die Bewehrung des Bauwerks werden mit einer Gleichspannung beaufschlagt. Hierbei werden die Bänder als Anode (+) und die Bewehrung als Kathode (-) geschaltet. Die permanente Kleinspannung mit niedrigem Stromfluss übersättigt die Bewehrung mit Elektronen und verhindert eine weitere Auflösung des Stahls. Das Prinzip des KKS ist in **Abb. 1** dargestellt.

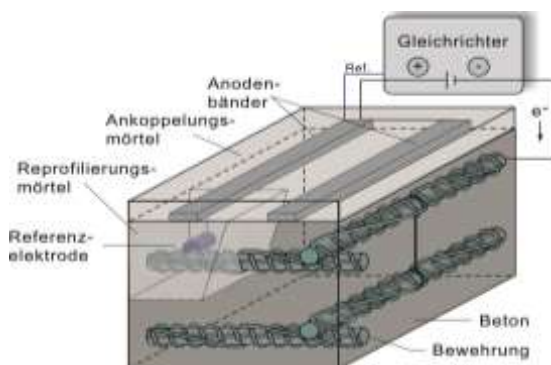


Abb. 1: Prinzipskizze eines KKS-Systems

Zum Nachweis eines ausreichenden Schutzes sowie zur permanenten Überwachung des Systems werden Referenzelektroden an ausgewählten Stellen eingebettet, an denen das Potential der Bewehrung als Spannung in [V] gegen die Referenzelektrode gemessen wird. Das Instandsetzungskonzept mittels KKS ist in einer Norm [2] geregelt und kann als „Allgemein Anerkannte Regel der Technik“ gewertet werden.

## 3. Durchgeführte Untersuchungen

### 3.1. Versuchsaufbau

Zur Untersuchung eines ausreichenden Schutzes der deckenunterseitigen Bewehrungslage im Trennrissebereich bei einem nur deckenoberseitig applizierten Anodensystem wurden Probekörper erstellt. Diese sind im Aufbau und Querschnitt einer Deckenplatte eines Parkhauses nachempfunden. Die Probekörper wurden mit chloridhaltigem Beton (Rotfärbung in **Abb. 2**) im Trennrissebereich und auf der Deckenoberseite erstellt, um eine praxisnahe Chloridverteilung zu erhalten.

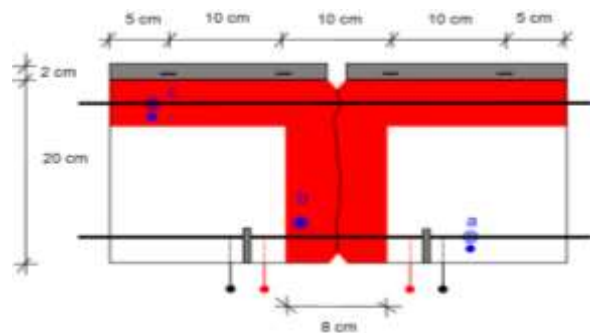


Abb. 2: Skizze der Probekörper

Der Elektrolytwiderstand und damit die Leitfähigkeit für den Schutzstrom hängt unter anderem von der Feuchtigkeit des Bauteils sowie der Porenstruktur und den im Porenwasser gelösten Ionen ab. Deswegen wurden drei Probekörper hergestellt, die sich in Zementart und w/z-Wert unterscheiden. Nachfolgend werden exemplarisch nur die Ergebnisse des Probekörpers P3 (CEM III Zement, w/z-Wert = 0,50) dargestellt. Dort war ein ausreichender Schutz der Bewehrung aufgrund des hohen Elektrolytwiderstands am schwersten nachzuweisen.

Um Strom- und Potentialmessungen der unteren Bewehrungslage im chloridbelasteten Beton unabhängig von der unteren Bewehrungslage im nicht chloridbelasteten Beton durchführen zu können, wurde die untere Bewehrungslage nachträglich durchtrennt. Weiterhin wurden Litzen angelötet und nach außen geführt, um einen Messzugang zu den innen liegenden

Bewehrungsstäben zu erhalten und die Stähle nachträglich wieder leitend verbinden zu können. Auf der Deckenoberseite wurden Anodenbänder aufgebracht und in einen KKS geeigneten Mörtel eingebettet. vgl. **Abb. 3**.

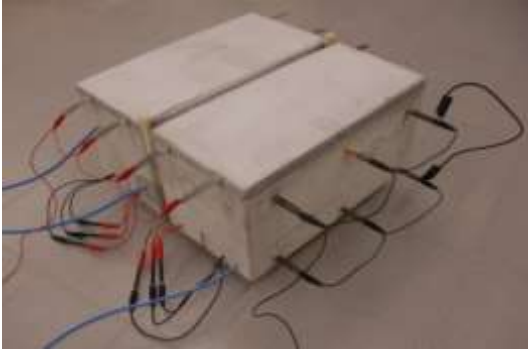


Abb. 3: Probekörper P3

Zur Überprüfung der Wirksamkeit des KKS-Systems wurden je Probekörper drei Referenzelektroden eingebettet. Eine der Elektroden dient zum Messen des Potentials des Stahls im chloridbelasteten Bereich an der Plattenoberseite (Ref. c), die anderen beiden Elektroden zur Potentialmessung des Stahls an der Plattenunterseite im chloridhaltigen Trennrisbereich (Ref. b) und im nicht chloridbelasteten Beton (Ref. a), siehe **Abb. 2**.

### 3.2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse ohne KKS

Die Probekörper wurden nach der Herstellung mehrere Wochen gelagert, bis sich ein erster Korrosionsprozess an der Bewehrung abzeichnete. Zur Überwachung der Feuchteverteilung wurden laufend die Elektrolytwiderstände zwischen den Bewehrungsstäben gemessen. Damit der richtige Zeitpunkt zum Beginn der KKS-Messungen gefunden werden konnte, wurden parallel die Potentiale der jeweiligen Referenzelektroden ermittelt, vgl. **Abb. 4**. Sobald darüber indirekt eine Korrosion am Stahl im Trennrisbereich festgestellt werden konnte, wurden exakte Korrosionsstrommessungen durchgeführt und danach das KKS-System gestartet.

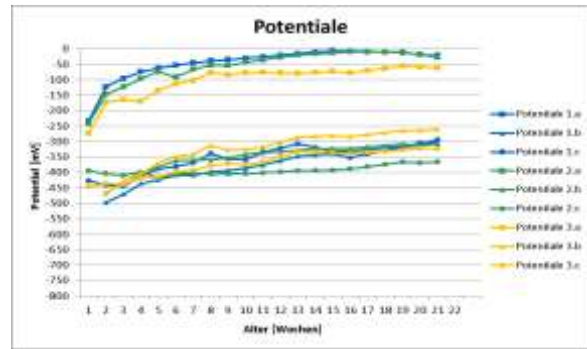


Abb. 4: Potentiale der Probekörper

Um die Korrosionsaktivität vor dem Einschalten des KKS-Systems bewerten zu können, wurden Nullwiderstands-Strommessungen mithilfe eines Zero Resistance Amperemeter (ZRA) durchgeführt, welches die im  $[\mu\text{A}]$  Bereich liegenden Korrosionsströme fehlerfrei erfasst. Die Ergebnisse der Korrosionsstrommessungen waren für die spätere Gegenüberstellung der Schutzströme entscheidend, um einen direkten Nachweis eines ausreichenden Schutzes führen zu können.

### 3.3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse mit KKS

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des KKS-Systems im deckenunterseitigen Trennrisbereich wurde eine Vielzahl verschiedener Versuche gefahren. Hierbei wurden sowohl Feuchtigkeitsverteilungen der Probekörper, als auch Treibspannungen des KKS-Systems variiert. Zur Überwachung des Systems wurden sämtliche Potential-, wie auch Stromverläufe in den Probekörpern ermittelt.

Zur Überwachung der Wirksamkeit des KKS-Systems wird nach Norm [2] eine sog. Ausschaltmessung durchgeführt. Dabei wird der Stromfluss vorübergehend unterbrochen und dabei das Potential der Bewehrung über 24 h gemessen. Der Depolarisationswert nach dieser Zeitspanne muss mindestens 100 mV betragen.

Ein exemplarischer Verlauf der Strom- und Potentialverteilung während einer Ausschaltmessung ist in **Abb. 5** dargestellt.

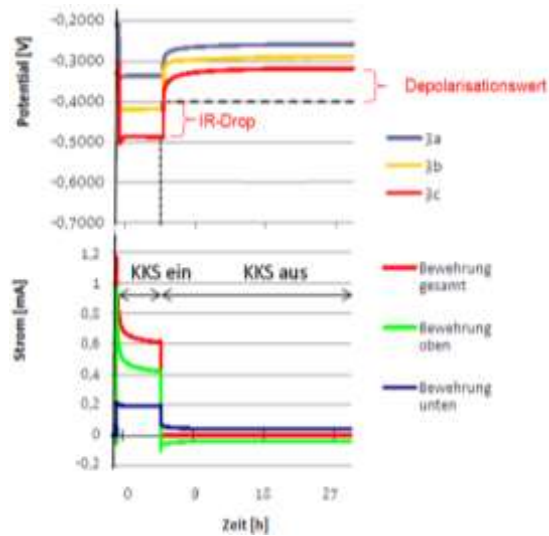


Abb. 5: Ausschaltmessung

Die normativ geforderten Potentialkriterien konnten für die deckenunterseitige Bewehrung im Trennrissbereich unter fast allen getesteten Versuchsbedingungen nicht erfüllt werden. Da eine Messung des Potentials nur einen indirekten Rückschluss auf einen ausreichenden Schutz zulässt, wurden zusätzlich noch exakte Schutzstrommessungen an allen Bewehrungsteilen durchgeführt. Diese wurden als Elektronenflussrichtung angegeben und sind in **Abb. 6** für 1,5 V Treibspannung dargestellt.

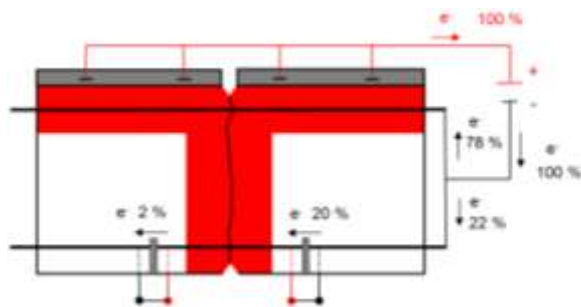


Abb. 6: Schutzstromaufteilung in P3

Die deckenunterseitige Bewehrungslage nimmt im Vergleich zur Deckenoberseite deutlich weniger Strom auf. Vergleicht man diese

Schutzstromaufteilung mit den in der Literatur [3] genannten, wonach die untere Bewehrungslage zwischen 10 und 30 % des Schutzstroms erhält, dann liegen die hier ermittelten 22 % in diesem Rahmen. Die stark auf der sicheren Seite errechnete Schutzstromdichte für die ungünstigste Versuchsbedingung der unteren Bewehrungslage im Trennrissbereich betrug  $6,14 \text{ mA/m}^2 \text{ Stahloberfläche}$ . Dieser Wert entspricht dem mehr als 15-fachen des entgegenfließenden Korrosionsstroms und liegt im Bereich gängiger Schutzstromdichten für Bestandsbauwerke (2 –  $20 \text{ mA/m}^2 \text{ Stahloberfläche}$ ), vgl. [2].

#### 4. Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen an den Probekörpern haben gezeigt, dass ein Schutz der unteren Bewehrung, speziell der Bewehrung im Bereich von Trennrissen, prinzipiell möglich ist. Die in der Norm [2] geforderten Ausschaltkriterien, ab denen von einem ausreichenden Schutz ausgegangen werden kann, erweisen sich im Fall von mehrlagig bewehrten Bauteilen als nicht geeignet, die Schutzwirkung einzelner Bewehrungsabschnitte durch das KKS-System sicher zu beurteilen.

Eine Schutzwirkung der Bewehrung im deckenunterseitigen Trennrissbereich konnte bei einer gängigen Treibspannung von 1,5 Volt an den Probekörpern weder über eine Ausschaltmessung, noch über andere normative Potentialkriterien nachgewiesen werden. Mittels separater Strommessung war dies jedoch möglich.

Ein technisch zielführender Weg ist, sofern im jeweiligen Fall praktisch durchführbar, die gezielte Strommessung ausgewählter, elektrisch getrennter Bereiche (z.B. untere Bewehrungslage, Trennrissbereich, obere Bewehrungslage), um eine Aussage über den Korrosionsschutz zu geben.



## Literaturverzeichnis

### Im Text verwendete Literatur:

- [1] Vestner, S. ; Dauberschmidt, C.: Instandsetzung von Parkbauten mit Kathodischem Korrosionsschutz: Lösungsmöglichkeiten von anspruchsvollen Detailpunkten. In: Bautechnik 91 (10/2014), Nr. 10
- [2] DIN EN ISO 12696:2012-05: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton
- [3] Raupach, M., Warkus, J. (2003), Zum rückseitigen kathodischen Korrosionsschutz einseitig korrodierender Stahlbetonbauteile – Modellversuche und numerische Berechnungen. Materials and Corrosion, 54: 394–403. doi: 10.1002/maco.200390089

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Literatur:

- 1. DIN EN ISO 12696:2012-05: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton
- 2. BAECKMANN, W. ; SCHWENK, W. ; PRINZ, W.: Handbuch des Kathodischen Korrosionsschutzes, Theorie und Praxis der elektrochemischen Schutzverfahren, 1988
- 3. THIENEL, K.-Ch.: Werkstoffe I; Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe - Stahl und NE-Metalle, UniBW, 2014



## **Autor**

Andreas Fraundorfer

Geb.: 25.08.1988 in München

### Ausbildung:

bis 07/2008	Abitur
07/2008 - 06/2009	Wehrdienst
09/2009 - 03/2013	Bachelorstudium: Bauingenieurwesen, Hochschule München (1,6)
03/2013 - 03/2015	Masterstudium (Teilzeit): Bauingenieurwesen, Hochschule München (1,3)

### Beruflicher Werdegang:

04/2013 - 03/2015	Labor- und Lehrassistent, Hochschule München
Seit 04/2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Hochschule München
Seit 07/2013	Freier Mitarbeiter, Ingenieurgesellschaft Dauberschmidt und Vestner mbH

### Praktika und Nebentätigkeiten:

09/2010 - 03/2013	Tutor: Bauchemie, Baustoffkunde
11/2011 - 07/2013	Werkstudent, Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH
16 Wochen	Praxissemester, Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH
6 Wochen	Praktikum, Fliesenleger
2 Wochen	Schweißlehrgang, SLV München
2 x 3 Wochen	ehrenamtlicher Betreuer bei Spielratz e.V.

## **Betreuer**

Diese Arbeit wurde an der Hochschule München, Fakultät 02 (Bauingenieurwesen) unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt im Rahmen des Fachs Bauwerkserhaltung angefertigt.



# „DIGITALE BAUSTELLE“ UNTERSUCHUNG ÜBER DIE EINARBEITUNG EINER BAUDATENERFASSUNGSSOFTWARE IN EIN MITTELSTÄNDISCHES BAUNTERNEHMEN

## Bachelorarbeit

*Jan Goebel*

Die Digitalisierung, die in der stationären Industrie unter dem Begriff 4.0 bereits vollständig Einzug gehalten hat, hat sich in der Baubranche noch nicht durchsetzen können. Die Gründe hierfür sind sicherlich branchenspezifisch. So ist jedes Bauvorhaben individuell und in diesem Sinne einmalig, bezüglich der Herstellungsbedingungen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von „Unikatherstellung“ [1]. Der durchgängige Einsatz digitaler Technologien im gesamten Bauwesen aber wäre wünschenswert, da dadurch bisher ungenutzte Produktivitätspotentiale ausgeschöpft werden könnten.

Vor diesem aktuellen Hintergrund war es das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit, die Einführung einer digitalen Zeiterfassung in ein mittelständisches Bauunternehmen zu untersuchen. Schwerpunkt der Arbeit war die Erstellung einer Kosten-Nutzen-Analyse als Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Umstellung. Dafür wurden zunächst die geeigneten digitalen Zeiterfassungssysteme ausgewählt, der aktuelle Prozess der analogen Arbeitszeiterfassung im Unternehmen dokumentiert und die Einstellung der Mitarbeiter hinsichtlich der Veränderung von Arbeitsabläufen untersucht. Die abschließende Analyse zeigte, dass durch die Einführung einer digitalen Zeiterfassung ein enormer Mehrwert für das Unternehmen generiert werden kann. Das Thema der Digitalisierung im Baugewerbe löst jedoch sowohl bei den Unternehmern, als auch bei den Mitarbeitern große Skepsis aus.

**Keywords:** Digitale Baustelle, Digitale Zeiterfassung, mittelständisches Bauunternehmen, Einsparpotenziale, Entscheidungsfindung

### Digitale Baustelle

Als Vorbild für die Digitale Baustelle diente die Maschinenbau-Industrie, in der die Digitalisierung bereits vollständig in der Produktentwicklung und –fertigung umgesetzt ist. Die

vier zentralen Bereiche der digitalen Baustelle sind die dreidimensionale Modellierung, die zentrale Datenverwaltung, die Prozesssimulation und die Logistik.

Im Zuge der dreidimensionalen Modellierung werden 3D-CAD Programme entwickelt, die allen



an der Planung und Ausführung Beteiligten zur Verfügung stehen, um ein lebendiges Modell zu schaffen, das bei notwendigen Änderungen schnell und komfortabel angepasst werden kann. Da sich in der Architektur die Anwendung von 3D-CAD-Systemen bereits durchgesetzt hat, stehen für den Bausektor inzwischen spezielle Anwendungen zur Verfügung.

Die Aufgabe der zentralen Datenverwaltung ist es, ein Datenmanagement einzurichten, das alle Informationen des Herstellungsprozesses, von der Planung, über die Ausführung bis zur Nutzung, zentral und strukturiert bearbeitet. Die Voraussetzung einer zentralen Datenverwaltung ist, dass das Datenmanagement von einem dafür bestimmten Verwalter geführt wird. Wem diese Aufgabe übertragen wird, dem Ingenieurbüro, dem Auftraggeber, der Baufirma, oder einem externen Büro, ist dabei nicht relevant.

## Forschung

Verbände, Politik, Unternehmen und Wissenschaft haben den Handlungsbedarf, die Digitalisierung in der Bauwirtschaft zu fördern erkannt und in den vergangenen Jahren diverse Forschungsprojekte, die sich mit dem Thema der Digitalisierung in der Bauwirtschaft auseinandersetzen in Auftrag gegeben. Der Schwerpunkt der Projekte liegt bei dem sogenannten „Building Information Modeling“ [2] (BIM).

Das Deutsche Institut für Normung (DIN) arbeitet seit 2014 an Richtlinienentwicklungen und Standardisierungen zu dem Thema BIM. Darüber hinaus wird an diversen Hochschulen, wie z.B. der TU-München, der TU Dresden, der RU-Bochum, der TU-Berlin und der RWTH-Aachen Grundlagenforschung betrieben

Im Februar 2015 haben führende Verbände und Institutionen aus den Bereichen Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken die „planen-bauen 4.0 – Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betriebens mbH“ gegründet. Die Gesellschaft versteht sich als nationale Plattform, als Kompetenzzentrum und als Ansprechpartner in den Bereichen

Forschung, Regelsetzung und Marktimplementierung. Es scheint, dass BIM sich in den nächsten Jahren auch in Deutschland etablieren wird. So sind bereits 2015, unabhängig von Verbänden oder anderweitigen Organisationen, fünf regionale BIM Initiativen gegründet worden. Die Voraussetzung für die BIM Methode ist eine partnerschaftliche Zusammenarbeit aller an einem Projekt beteiligten Unternehmen und Personen. Eine Kultur der Partnerschaft, die der bisherigen Herangehensweise nicht unbedingt entspricht und die gesamte Branche vor große Herausforderungen stellen wird.

## Zeiterfassung

Hat sich in der Bauindustrie die digitale Erfassung und Bearbeitung der Personalarbeitszeit bereits fast vollständig durchgesetzt, werden die Arbeitsstunden in den meisten klein- und mittelständischen Betrieben noch handschriftlich dokumentiert. Das Schreiben, das Einsammeln der Stundenzettel, die Überprüfung und Eingabe in das Rechnungswesen und das Lohnprogramm ist zeitaufwändig und oftmals wenig präzise. Dies hat zur Folge, dass der größte Kostenfaktor auf dem Bau, die Personalarbeitszeit, oft ungenau und als Schätzwert dokumentiert wird. Differenzen zwischen der tatsächlich geleisteten Arbeitszeit und der abgerechneten Arbeitszeit sind bei dieser Vorgehensweise kaum zu vermeiden. Mitarbeiterstunden, die nicht erfasst sind, können nicht abgerechnet werden. Dies hat einen Mehraufwand und eine verspätete Rechnungsstellung zur Folge. Für die elektronische Zeiterfassung steht eine Vielzahl von Zeiterfassungssystemen zur Verfügung. Bei den stationären Verfahren werden vor allem Terminals eingesetzt. Mobile Zeiterfassungssysteme kommen durch die rasante Entwicklung von Mobiltelefonen, Smartphones, Laptops, Tablets und das Internet vermehrt zum Einsatz. Durch die Entwicklung mobiler Terminals ist das Chipkartensystem inzwischen sowohl in der

mobilen, als auch in der stationären Zeiterfassung einsetzbar.

### Einarbeitung in ein mittelständisches Unternehmen

Um die Einführung eines Zeiterfassungssystems in ein mittelständisches Bauunternehmen zu verwirklichen, erschien es im Vorfeld sinnvoll, zunächst den Ist-Zustand im Unternehmen zu dokumentieren; d.h. jeden einzelnen Schritt der Zeiterfassung, und wer für diesen verantwortlich ist, festzuhalten. Entscheidend war zudem, den jeweiligen Zeitaufwand zu bestimmen, um die Kosten, die momentan für die Zeiterfassung im Unternehmen entstehen, berechnen zu können. Darüber hinaus war es wichtig, Informationen über die Einstellung der Mitarbeiter zu erhalten, um einschätzen zu können, in wieweit die Belegschaft einer Digitalisierung zustimmen würde. Nach eingehender Überlegung erschien es sinnvoll, die entsprechenden Daten durch ein persönliches, fragebogengestütztes Interview zu erheben.

Die Ergebnisse der Befragung wurden der Unternehmensführung mitgeteilt und bildeten die Grundlage für die Auswahl von 5 Anbietern unterschiedlicher digitaler Zeiterfassungssysteme. Die ausgewählten Programme wurden auf ihre Wirtschaftlichkeit und Kompatibilität mit dem BRZ geprüft und ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden als Entscheidungsgrundlage zur Einführung einer digitalen Zeiterfassung der Unternehmensleitung vorgelegt.



Abb. 1: Istzustand der Zeiterfassung im Referenzunternehmen

## Fazit

Die Untersuchung ergab, dass die erwarteten Vorteile generiert werden können, und das Unternehmen dadurch einen Wettbewerbsvorteil erwirken kann. Die Analyse ergab, dass 48,9% des Stundenaufwands pro Monat für die Zeiterfassung eingespart werden können und ca. 60% der Schnittstellen verringert werden können.

Die Entscheidungsfindung innerhalb der Firmenleitung für eine Umstellung gestaltete sich dennoch schwierig, da es riskant erschien, einen funktionierenden Ablauf zu verändern und nicht absehbar ist, inwieweit die Mitarbeiter, deren Haltung eher skeptisch ist, für eine Veränderung motiviert werden können.

Trotz aller Bedenken entschloss sich die Unternehmensführung nach Abgabe der Bachelorarbeit, die Zeiterfassung zu digitalisieren. Der Autor hat die Möglichkeit, erhalten, die Implementierung zu begleiten und somit die Herausforderungen, die sich im Alltag durch eine Umstellung ergeben zu dokumentieren und zu begleiten.

Zentrale Erkenntnisse der Arbeit sind, dass vielfältigste Systeme für eine Digitalisierung des Baugewerbes zur Verfügung stehen. Aber die Vision und der unternehmerische Mut, neue Techniken zu nutzen und Innovationen voranzutreiben, in klein- und mittelständischen Baubetrieben kaum vorhanden ist. So stellt sich die Frage, warum die Skepsis so groß ist und wie Unternehmen unterstützt werden können, um das brachliegende Potential ausschöpfen zu können.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

[1]:

<http://www.fml.mw.tum.de/forbau/images/Dokumente/Zusammenfassung%20der%20Ergebnisse%20f%C3%BCr%20Homepage%20passwort.pdf>

[2]:

[http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/3Rahmenbedingungen/2013/BI\\_MLeitfaden/Endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/3Rahmenbedingungen/2013/BI_MLeitfaden/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Seite 87)

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Willibald A. Günther, Andre Bormann; Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011; ISBN 978-3-642-16485-9
2. [http://www.fml.mw.tum.de/forbau/images/Dokumente/Kongressband\\_online.pdf](http://www.fml.mw.tum.de/forbau/images/Dokumente/Kongressband_online.pdf)
3. <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/bautechnik/artikel/vdi-agenda-building-information-modeling/>
4. <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/PDF/wissenschaft-trifft-praxis-ausgabe2,property=pdf,bereich=md,sprache=de,rwb=true.pdf>
5. [https://blog.commerzbank.de/verantwortung-erleben/2015-mai/2015\\_05\\_11\\_fl\\_up\\_15\\_studie\\_es\\_neu.pdf](https://blog.commerzbank.de/verantwortung-erleben/2015-mai/2015_05_11_fl_up_15_studie_es_neu.pdf)
6. <http://www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=News.show&id=243>



### **Autor**

Jan Goebel, geboren am 08.02.1991 in Erlangen, studierte Bachelor of Engineering Bauingenieurwesen an der Hochschule München.

### **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Bauingenieurwesen im Fachgebiet Baubetriebsplanung und Projektentwicklung, Hochschule München, Professor Thomas Clausen.

# SCHUBKRAFTÜBERTRAGUNG MIT ZAHNLEISTEN ZWISCHEN MODULAREN BAUTEILEN IN STAHLBETON

## Bachelorarbeit

*Kai Hofmann, B. Eng.*

Für einen modularen Fachwerkträger aus Stahlbeton wurden Varianten zur Schubkraftübertragung mit Zahnleisten zwischen den Bauteilen untersucht und vergleichend gegenübergestellt. Alle Betrachtungen basieren auf einer Schubkraft von 800 kN zwischen den Elementen aus hochfestem Beton C100/115 und ultra-hochfestem Beton (UHPC) mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck}$  von 160 N/mm<sup>2</sup>. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von einem Beton mit einer höheren Druckfestigkeit zu kürzeren Verzahnungslängen führt. Der Einsatz einer Vergussfuge zwischen den Zahnleisten zum Toleranzausgleich erfordert einen hochwertigen Vergussmörtel, wodurch die Wirtschaftlichkeit abnimmt. Eine möglichst kurze Verzahnungslänge wird durch eine trockene Fuge zwischen einer Verzahnung aus Stahl-Stahl mit möglichst kleinen Zähnen realisiert.

**Keywords:** Schubkraft, Zahnleiste, hochfester Beton, ultra-hochfester Beton, UHPC, modulares Bauen

### Aufgaben- und Zielstellung

Um einen Fachwerkträger aus Stahlbeton kosten- und aufwandsoptimiert herstellen zu können, ist ein großer Einsatz von Fertigteilen und ein geringer Arbeitsaufwand auf der Baustelle entscheidend. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit anderen Bachelorarbeiten ein modularer Fachwerkträger entwickelt, der unter Einsatz von UHPC und einer hochleistungsfähigen Verbindung zwischen den Elementen eine Spannweite von bis zu 60 m überbrücken kann. Die Grundlage hierfür stellt die Arbeit von Henze [3] dar, in der die Kraftübertragung nur durch Reibung und Vorspannen der Elemente erfolgt.

In dieser Arbeit wurde eine Kraftübertragung mit Zahnleisten aus Stahl zwischen modularen Bauteilen in Stahlbeton am Beispiel eines Fachwerkträgers untersucht. Die Grundlagen der Bemessung einer Zahnleiste aus Stahl als verbindendes Element wurde in der Arbeit von Schmid [4] untersucht und von Dehlinger [1] mit einer Vergussfuge erweitert. In diesem Zusammenhang wurde eine Krafteinleitung von 800 kN in einen hochfesten und einen ultra-hochfesten Beton untersucht und die erforderliche Länge der Verzahnung  $l_L$  für einen Stahl S355 ermittelt.



## Modularer Fachwerkträger

Im modernen Hallenbau spielt die Kosten- und Bauzeitminimierung eine immer größere Rolle, wodurch ein möglichst großer Vorfertigungsgrad erforderlich wird. Während im Stahl- und Holzbau die Fügung von modularen Bauteilen baupraktischer Alltag ist, wird im Stahlbetonbau nur im Bereich von kleinen Stützweiten auf Fertigteile zurückgegriffen. Hauptgrund hierfür ist die vergleichsweise aufwändige Fügung von vorgefertigten Elementen. Der Einsatz von Anschlussbewehrung erhöht den Schalungsaufwand und erfordert zudem eine verstärkte Bauüberwachung zur Qualitätssicherung.

Eine Alternative hierfür stellt die Vorspannung dar, bei der sämtliche Zugkräfte überdrückt werden. Die Druckkräfte können über Kontaktpressung direkt in die angrenzenden Bauteile weitergeleitet werden. Zur Übertragung der Schubkraft wird hierfür eine Zahnleiste eingesetzt. Hierbei wird zwischen Pfosten/Diagonale und Gurt ein Knotenelement eingebaut, welches maßgebend für die vorhandene Fläche der Kraftübertragung ist.

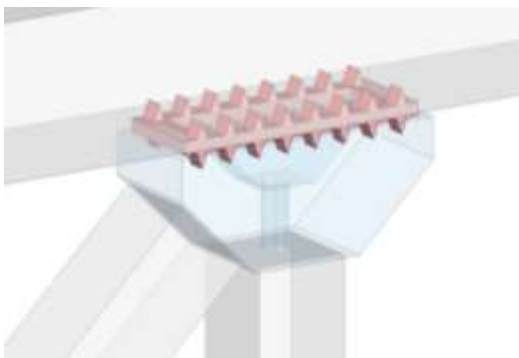


Abb. 1: Knotenelement im Fachwerkträger (beispielsweise mit ortbetonseitiger Zahnleiste (V2))

Um die Elemente gegeneinander vorspannen zu können, wird das Knotenelement innen hohl ausgeführt. Durch einen umlaufenden Rand, der im Nachgang verschlossen wird, kann auch im Brandfall der Stahl vor einer ungewollten Temperatureinwirkung geschützt werden.

## Kopfbolzendübel

Eine bessere Vergleichbarkeit der Wirtschaftlichkeit der Zahnleiste wird durch eine Vergleichsrechnung mit einer äquivalenten Anordnung von Kopfbolzendübeln erreicht. Die Bemessung erfolgt nach Eurocode 4 und Feldmann et al. [2] für eine Betondruckfestigkeit  $f_{ck}$  bis 120 N/mm<sup>2</sup>.



Abb. 2: Kopfbolzendübel (V1) als Vergleichsrechnung

Aufgrund der baupraktischen Erfahrung im Verbundbau, ist diese die einzige in der aktuell gültigen Norm geregelte Variante. Unter den gegebenen Vorgaben sind jedoch die Randabstände im Beton nicht eingehalten, so dass der Wert der Verdübelungslänge von 4440,0 mm für den Fachwerkträger lediglich ein theoretisches Ergebnis darstellt.

## Ortbetonseitige Zahnleiste

Die ortbetonseitige Zahnleiste entspricht nicht dem Ziel der modularen Fügung, jedoch stellt sie die Grundlage für alle Verzahnungen dar, da sie die Verankerung des Stahlbauteils im Knotenelement übernimmt und somit auch die minimale Knotengeometrie bestimmt. Die Bemessung erfolgt auf Grundlage von Schmid [4] über ein Stabwerkmodell unter Berücksichtigung der Längsbelastung des Systems und der Länge der Zahnleiste.

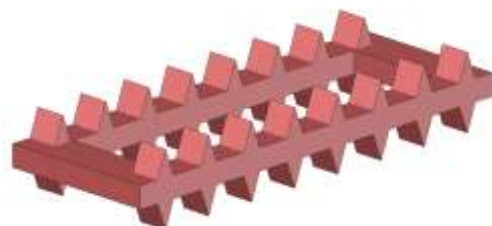


Abb. 3: Zahnleiste in Ortbeton (V2) nach Schmid

Diese Zahnleiste wurde in Verbindung mit zwei unterschiedlichen Betondruckfestigkeiten untersucht. Für die Variante V2a wurde ein hochfester Beton C100/115 eingesetzt, die eine Verzahnungslänge im Beton von 626,9 mm erfordert. Für die Variante V2b wurde ein ultrahochfester Beton mit einer charakteristischen Druckfestigkeit  $f_{ck}$  von 160 N/mm<sup>2</sup> angesetzt, die mit einer erforderlichen Länge von 452,1 mm eine um etwa 30% kürzere Zahnleiste und somit auch einen entsprechend kleineren Knoten ermöglicht.

### Zahnleiste Stahl-Stahl

Die effektivste Kraftübertragung erfolgt über zwei gegenläufige Elemente aus Stahl. Die Zahnleisten Stahl-Stahl mit einer trockenen Fuge ermöglichen neben der modularen Fügung auch einen zerstörungsfreien Rückbau. Die vereinfachte Geometrie erfolgt in Variante V3a in Anlehnung an die Abmessungen nach EC2 für Stahlbeton.

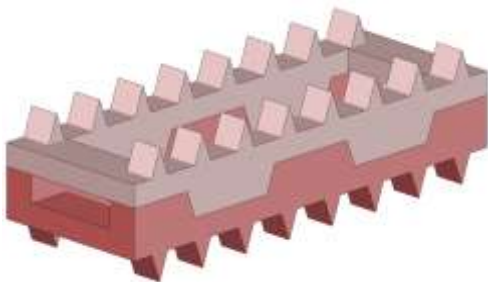


Abb. 4: Zahnleiste Stahl-Stahl (V3a) in Anlehnung an EC2

Die zu übertragende Horizontalkraft wird, unter Berücksichtigung der Vorspannung, auf die geneigten Flächen aufgeteilt. Hierbei wird eine Verzahnungslänge von 454,6 mm erforderlich. Eine optimierte Geometrie (V3b) wird durch eine Anordnung von mehreren kleinen Zähnen erzielt.

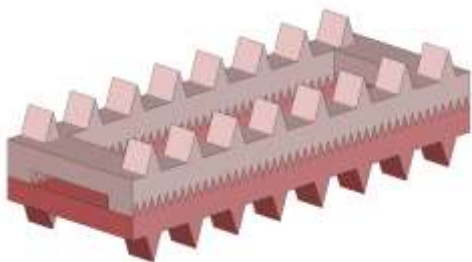


Abb. 5: Zahnleiste Stahl-Stahl (V3b) mit optimierter Zahngeometrie

Über einen iterativen Prozess mit Hilfe des FE-Programms SOFiSTiK wird die minimale Verzahnungslänge ermittelt, bei der die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  nach von Mises gerade nicht überschritten wird. Mit einer Zahnhöhe  $h_z$  von 15,0 mm ist lediglich eine Verzahnungslänge von 308,0 mm erforderlich. Eine Zahnhöhe von 30,0 mm erfordert eine etwas längere Leiste und wird daher nicht weiter untersucht.

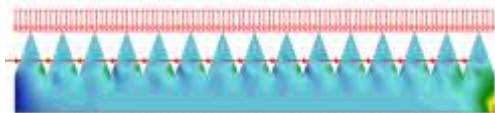


Abb. 6: Vergleichsspannung  $\sigma_v$  der Zahnleiste ( $h_z = 15,0$  mm)

### Zahnleiste mit Vergussmörtel

Eine baupraktische Variante stellt eine Zahnleiste mit einer Vergussfuge dar, bei der große Toleranzen der Montage ausgeglichen werden können.

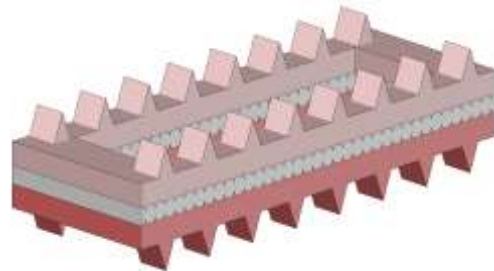


Abb. 7: Zahnleiste mit Vergussmörtel (V4)

Voraussetzung hierfür ist der Einsatz eines leistungsfähigen Vergussmörtels zwischen den Zahnleisten, der die gesamte Kraft übertragen kann. Die Bemessung der Fuge erfolgt nach Dehlinger [1] über ein Stabwerkmodell mit einer Druckfestigkeit  $f_{ck}$  des Mörtels von 67,7 N/mm<sup>2</sup>. Damit ist eine Verzahnungslänge von 581,7 mm zur vollständigen Kraftübertragung erforderlich.

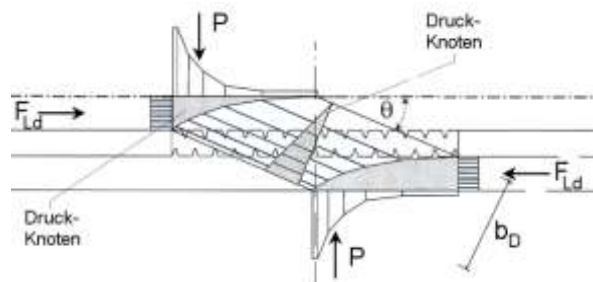


Abb. 8: Zahnleiste mit Vergussmörtel (V4) aus Dehlinger [1]

## Zusammenfassung

Die Variante mit Kopfbolzendübel (V1) stellt aufgrund der nicht eingehaltenen Randabstände im Knotenelement für den Fachwerkträger nur einen Referenzwert dar.

Die Zahnleiste in Ortbeton (V2) zeigt den Einfluss des verwendeten Betons im Fachwerkträger. Die Variante V2a wurde mit einem hochfesten Beton C100/115 untersucht. Dem gegenüber steht ein deutlich besseres Ergebnis von Variante V2b mit einem ultra-hochfesten Beton ( $f_{ck} = 160 \text{ N/mm}^2$ ).

Die Zahnleiste mit Vergussmörtel (V4) hat den Vorteil, dass große Toleranzen ausgeglichen werden können. Jedoch sind ein höherer Arbeits- und Kontrollaufwand auf der Baustelle, sowie eine hohe Druckfestigkeit des Mörtels erforderlich.

Die Variante Stahl-Stahl zeigt deutlich den Einfluss der Zahngröße auf die erforderliche Verzahnungslänge. Die Ausführung nach EC2 (V3a) mit der minimalen Anzahl an Verzahnungen erfordert dementsprechend eine größere Länge als

Variante V3b mit vielen kleinen Zähnen. Zudem ist der Toleranzausgleich geringer, da die wenigen vorhandenen Flanken vollflächig anliegen müssen um die Kraft zu übertragen. Die Variante mit vielen kleinen Zähnen (V3b) ermöglicht die kleinste Leistenlänge von 308,0 mm.

Die optimale Kombination im Fachwerkträger stellt die Variante V3b mit einer betonseitigen Einbindung über Variante V2b im ultra-hochfesten Beton dar. Wenn beide Leistenhälften gleichlang ausgeführt werden, stehen der Verbindung Stahl-Stahl zudem mehr Zähne als erforderlich zur Verfügung, was einen größeren Ausgleich von Bautoleranzen in Trägerlängsrichtung ermöglicht.

Neben der Verwendung am Fachwerkträger sind für die Zahnleiste viele weitere Einsatzmöglichkeiten denkbar, an denen große Querkräfte übertragen werden müssen. Somit können zum Beispiel geneigte Stahlstreben an einen Stahlbetonkern angebunden oder Querträger mittels Vorspannung ohne zusätzliche Konsolen an eine vertikale Wand angeschlossen werden.

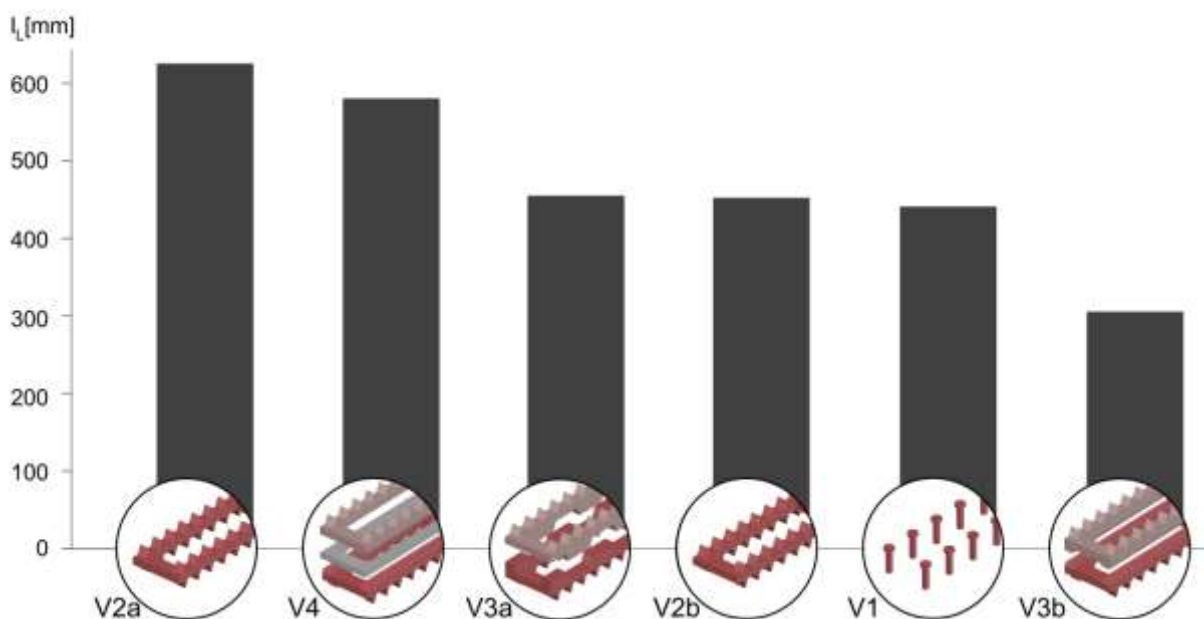
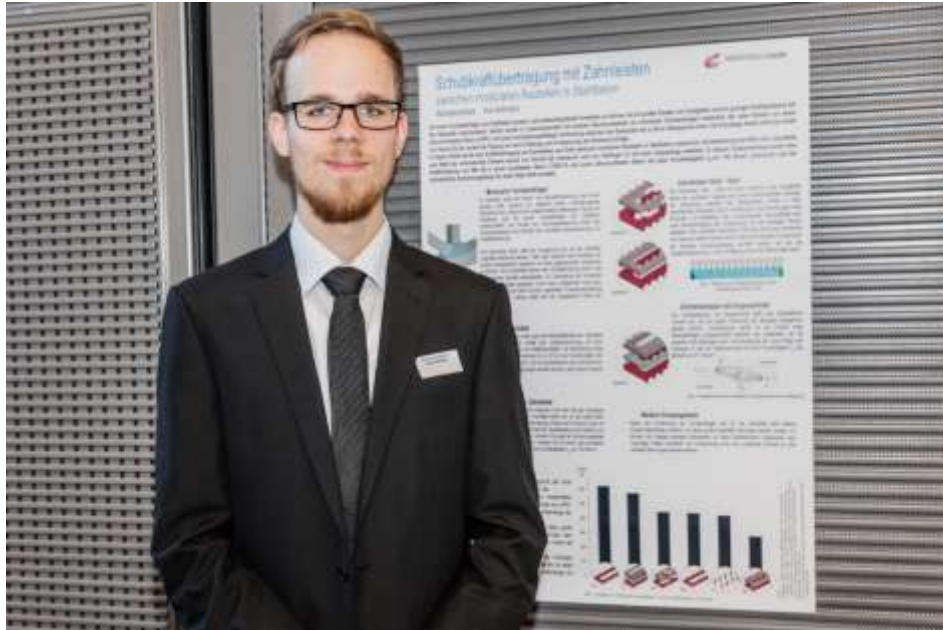


Abb. 9: Erforderliche Verzahnungslänge der Kraftübertragungsmethoden für 800 kN.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] Dehlinger, C., Stählerne Verzahnungen für Stahlbetonkonstruktionen. Aachen: Shaker Verlag, 2004
- [2] Feldmann, M. et al; Use of shear connectors in high performance concrete, In: Camotin, D. et al (Hrsg.): Stability and Ductility of steel structures Lisbon, Portugal, 2006
- [3] Henze, S.; Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton, Universität Leipzig, 2009
- [4] Schmid, V.; Hochbelastete Verbindungen mit Zahnleisten in Hybridtragwerken aus Konstruktionsbeton und Stahl, Universität Stuttgart, 2000



## Autor

Kai Hofmann, B. Eng.

Geboren 25.03.1992 in Fürth

### Bildungsweg:

- Seit 03/2015: Studium Bauingenieurwesen (M. Eng.) an der Hochschule Koblenz
- 10/2011 – 03/2015: Studium Bauingenieurwesen (B. Eng.) an der Hochschule Coburg
- 2. Platz des Joachim Kurbasik-Preis für die Abschlussarbeit
  - Abschlussnote Bachelor of Engineering: 1,4
- 05/2011 – 09/2011: Vorstudium Bauingenieurwesen an der Hochschule Coburg
- 09/2009 – 05/2011: Emmy-Noether-Gymnasium Erlangen
- 09/2002 – 08/ 2009: Hardenberg-Gymnasium Fürth

### Praktika & Zusatzqualifikationen

- 06/2015 – 11/2015: Wissenschaftliche Hilfskraft im Fachgebiet Holzbau an der HS Koblenz
- 11/2014 – 01/2015: Studentischer Tutor im Fach „Grundlagen der Bemessung im Ingenieurbau“ an der HS Coburg
- 03/2014 – 10/2014: Werkstudent im Ingenieurbüro Dr. Kreutz + Partner in Bamberg
- 08/2013 – 02/2014: Praxissemester im Ingenieurbüro Dr. Kreutz + Partner in Bamberg
- 10/2012 – 03/2013: Studentischer Tutor für Studierende des Bauingenieurwesens an der HS Coburg

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule Coburg unter Betreuung von Prof. Dr. Ing. H. Falter und J. Schmidt M. Sc.

# BAULEITUNG IN HOCHBAU UND HAUSTECHNIK: PROBLEME UND LÖSUNGSANSÄTZE ANHAND VON PRAXISBEISPIELEN

## Bachelorarbeit (Bachelor's Thesis)

*Michael, Jauchmann*

**Die Arbeit thematisiert das Zusammenwirken des Hochbaus und der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) während des Planungs- und Bauablaufs und vergleicht dabei aktuelle Theorie und Praxis. Anhand zweier gegenwärtiger Bauvorhaben wird der Praxisbezug hergestellt, die Theorie stellen die Leistungsphasen der HOAI 2013 dar. Hingegen dem Titel, der nur die „Bauleitung“ und damit die Leistungsphase 8 der HOAI als Thema nennt, wurde es für wichtig empfunden, die vorausgehenden Phasen wegen ihrem Einfluss auf die Phase 8 mit einzubeziehen. Expertenbefragungen mit ausgewählten Planern des Hochbaus, sowie der TGA ergaben ein breites Spektrum an Aussagen. Die Planer und Fachplaner wurden nach Theorie und Praxis, ihrer persönlichen Bewertung der aktuellen Situation und zukünftigen Entwicklungen befragt. Anschließend erfolgte eine gezielte Auswertung und Reduzierung der Aussagen und die Darstellung der wesentlichen Konflikte.**

**Keywords:** Hochbau, Technische Gebäudeausrüstung, TGA, HOAI, Leistungsphasen, Theorie, Praxis, Bauleitung, Expertenbefragung, Risikoanalyse

### Hintergrund der Arbeit

Im heutigen Leben nimmt die Technik einen immer höheren Stellenwert in der Gesellschaft ein. Auch Bauwerke bleiben von dieser Technologisierung nicht unberührt.

Die Gewerke des Ausbaus haben heutzutage einen über 50%-igen Anteil an den Baukosten [1]. Dabei ist zwischen technischer Gebäudeausrüstung und dem raumbildenden

Ausbau zu unterscheiden. Die TGA stellt innerhalb der Ausbaugewerke einen Anteil von ca. zwei Dritteln [2].

Daran ist die Bedeutung der Haustechnik und des Abstimmungsbedarfs mit den Hochbaugewerken erkennbar.

## Beispielprojekte

Um einen Praxisbezug zu schaffen, bot mir das Ingenieurbüro Kessler & Rupp an, zwei aktuelle Projekte und die daran Beteiligten zu befragen.

Es handelt sich hierbei um das „Technologiezentrum Augsburg“ (kurz: TZA) mit einem Bauvolumen von ca. 29 Millionen € und um das sogenannte „Centre for Advanced Laser Applications“ (kurz: CALA) mit einem Bauvolumen von ca. 63 Millionen €.

## Vorgehensweise

Zu Beginn stand eine ausführliche Literaturrecherche über das Themengebiet an. Die kritische Auseinandersetzung mit der neuen HOAI und deren Formulierungen nahm hierbei einen großen Anteil in Anspruch. Zur vertiefenden Informationsbeschaffung diente eine Reihe von Interviews mit Experten der jeweiligen Fachgebiete.

Durch gezielte Auswertung und Gegenüberstellung der Interviewergebnisse wurden fünf Kernkonflikte ausgearbeitet. Weiterverarbeitet wurden diese mit Hilfe einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikoanalyse.

## Interviewkonzept

Insgesamt wurden Interviews mit 10 Personen geführt: 2 Architekten, 2 Bauleiter, 3 HLS Techniker und 3 Elektro Techniker.

Folgende Themenbereiche wurden schlussendlich abgefragt:

- Grundlagenermittlung/Bedarfsermittlung
- Konflikte & Koordination mit Architekten
- Konflikte & Koordination mit Fachingenieuren
- Konflikte & Koordination mit Bauleitern
- moderne Ansätze (Building Information Modeling, 3D-Planung)
- HOAI 2013
- firmeninterne Aspekte
- persönliche Stellungnahme

## Prägnante, ausgewählte Konflikte

Vorab ist zu bemerken, dass sämtliche hier ausgewählten Konflikte zusammenhängen und sich gegenseitig beeinflussen.

Als Ergebnis der Interviewauswertung wurden folgende fünf Kernkonflikte festgestellt:

### Mangelhafte Grundlagenermittlung (LPH1)

Die Grundlage einer vollständigen Planung ist die Leistungsphase 1. Das Problem liegt hier beim Auftraggeber, der den Stellenwert dieser selten realisiert und folglich dem jeweiligen Planer, oder Fachplaner wichtige Randbedingungen nicht mitteilt. Monetäre oder politische Gründe sind hierbei oft der Grund, weshalb die LPH1 möglichst schnell und deshalb ungenau abgewickelt wird.

Folglich muss sich der Planer wichtige Informationen selbst erarbeiten bzw. beschaffen. Zudem kommen zu einem späteren Zeitpunkt Wünsche seitens des Auftraggebers auf, die nur noch schwer realisierbar sind und zu einem späteren Zeitpunkt immense Folgen haben können.



**Platzbedarf & Koordination der TGA**

Grundsatz einer vollkommenen Planung nach HOAI ist die Zusammenarbeit und Abstimmung der Planer untereinander. Diese Abstimmung stellt sich vor allem zwischen ELT und HLS Planern als schwierig dar.

Die versäumte Abstimmung tritt meist erst in der Ausführung ans Licht, wenn der vorhandene Platz für Installationen, beispielsweise in einer untergehängten Decke, nicht mehr ausreicht. Folglich treten Probleme in der LPH8 auf, die den Bauablauf stören können. (→ Koordination & Kommunikation in der LPH8)

**Planungsstände von Architektur und TGA in LPH3**

Dieses Problem ist in der HOAI selbst verankert und wurde speziell nur von einem Experten genannt. Ich selbst halte diesen Punkt für beachtenswert, weshalb er hier aufgeführt ist.

Von Architekt und Fachplaner werden hierbei unterschiedliche Planungstiefen gefordert. Der jeweilige TGA Planer soll seine Anlagenteile nach HOAI komplett dimensioniert haben,

während der Architekt eine genehmigungsfähige Planung anstrebt.

Die Fachplanung soll also einen sehr hohen Detaillierungsgrad vorweisen, während sich die Architektur eher in der Anfangsphase der Planung befindet.

**Unzureichende Terminplanung in frühen Leistungsphasen**

Um als Bauleiter in der Ausführungsphase einen Terminplan fortschreiben zu können, muss ein Grundgerüst vom zugehörigen Planer vorliegen. In den Planungsphasen (LPH2 - LPH5) konnte hier ein großes Defizit festgestellt werden.

Die HOAI 2013 legt, weitaus mehr als die alte HOAI, verstärkt Wert auf eine Terminplanung, zu erkennen an der Erwähnung in nahezu allen Leistungsphasen. Verändert wurden v.a. die Formulierungen in den Leistungsphasen 2-5. Die Vorleistungen der Planer und Fachplaner sind hierbei oft nicht genau genug. Im Fokus stehen hierbei vor allem Vorgangsdauern.

Bezeichnung	Wahrscheinlichkeit	Auswirkung	Gewichtung
Mangelhafte Grundlagenermittlung	9	4	36
Platzbedarf & Koordination der TGA	8	3	24
Planungsstände von Architektur & TGA in LPH3	9	3	27
Unzureichende Terminplanung in frühen LPHs	6,5	3	19,5
Koordination & Kommunikation in LPH8	10	4	40

Tabelle 1: Risikoanalyse

### Koordination & Kommunikation in LPH8

Die Leistungsphase 8 stellt die Ausführung dar. Hier treten die Defizite und Fehler aus den vorhergehenden Phasen ans Licht und müssen möglichst zeitnah gelöst werden.

Dabei spielt die Kommunikation eine sehr große Rolle, gleichzeitig stellt sie jedoch das größte Problem in dieser Phase dar. Umso mehr Beteiligte ein Projekt hat, umso schwieriger verläuft die Kommunikation und Koordination. Dinge werden vergessen oder nicht weitergereicht, hinzu kommen oft zwischenmenschliche Differenzen zwischen einzelnen Beteiligten, die die Abstimmungen zusätzlich belasten.

### Risikoanalyse

Eintrittswahrscheinlichkeit (1 = 10%, 10 = 100%) und Auswirkung (1 = sehr leicht, 5 = sehr schwer), beide multipliziert ergibt sich eine Gewichtung. (Tabelle 2)

Die gesamte Auswertung ist in Tabelle 1 dargestellt. Zu erkennen ist ein gemäßigtes Risiko, zwei bedenkliche und zwei schwerwiegende Risiken. die Leistungsphase 1 und die Leistungsphase 8.

Die Grundlagenermittlung (LPH1), da sie nicht ernst genommen wird und schwere Folgen im späteren Projektablauf aufwirft. Und die Koordination und Kommunikation in der LPH8, wegen des Zeitdruckes der hier herrscht. Werden hier überhastete, nicht durchdachte Entscheidungen getroffen, kann es schnell zu einer Behinderung des Bauablaufs kommen.

### Fazit

Im aktuellen Baugeschehen scheinen diese Probleme weitgehend in Kauf genommen zu werden. Aufgrund der anfangs erläuterten Relevanz der TGA werden die zukünftigen Abstimmungen nicht einfacher.

Die Auswertung zeigt hier eindeutig die größten Konflikte auf, die in den vorhergehenden Phasen begründet werden können.

Zukünftig sollte der Ansatz einer „gemeinsamen“ Planung verfolgt werden, um Konflikten in der Ausführung möglichst vorzubeugen.

Gewichtung	
Sehr geringes Risiko	1-5
Geringes Risiko	6-19
Kalkulierbares Risiko	20-29
Hohes Risiko	30-44
Extrem hohes Risiko	45-50

Tabelle 2: Gewichtung eines Risikos

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Berlin, DIW. Statista - Das Statistik Portal. Bauvolumen im Baugewerbe in Deutschland nach Haupt- und Ausbaugewerbe in den Jahren 2002 bis 2013 (in Milliarden Euro)\*. [Online] [Zitat vom: 20. August 2015.]  
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/252500/umfrage/bauvolumen-indeutschland/>.
- [2]: Berlin, DIW. Statista - Das Statistik Portal. Umsatz im deutschen Ausbaugewerbe nach Sektoren. [Online] [Zitat vom: 20. August 2015.]  
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/254127/umfrage/umsatz-imdeutschen-ausbaugewerbe-nach-sektoren/>.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Ulrich Bauch, Hans-Joachim Bargstädt. Praxis-Handbuch Bauleiter. Dresden/Weimar : Rudolf Müller Verlag, 2014
2. Locher, Koeble, Frik. Kommentar zur HOAI. 12. Auflage. Reutlingen : Werner Verlag, 2014.
3. Korbion, H./Mantscheff, J./Vygen, K. HOAI 2013. München : Beck Verlag, 2013.



## **Autor, Coautoren**

Michael Jauchmann  
geboren am 22.04.1993

Justus-von-Liebig Gymnasium Neusäß:	05/2011 Abitur
Hochschule Augsburg	12/2015 Bachelor of Bauingenieurwesen
IB Kessler & Rupp	10/2015

## **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Architektur und Bauwesen der Hochschule Augsburg, unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Krön, M.Eng.

# AKTIVE THERMOGRAFISCHE UNTERSUCHUNGEN AN ELEMENTWÄNDEN AUS BETON

## Masterarbeit

*Franz Mathe*

**Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Optimierung der Randbedingungen für thermografische Aufnahmen, um Feuchtestellen zerstörungsfrei in Elementwänden aufspüren zu können. Zunächst wurde an Handstücken geprüft, ob es unter Laborbedingungen möglich ist, mittels aktiver Thermografie Wasser zu detektieren. Im Anschluss wird ein Ausblick gegeben, ob die Ergebnisse auf größere Elementwandstücke übertragen werden können.**

**Keywords:** Baugewerbe, Zusammenfassung, aktive Thermografie, Beton, Wärmebildkamera, Bauschäden, Elementwände, Labor, Wasserschaden,

## Aufgabenstellung

Die Aufgabe war es, die Randbedingungen für ein Verfahren zu verfeinern, welches sich aktive Thermografie nennt. Zu diesem Thema wurden in den vergangenen Jahren zwei Arbeiten angefertigt, welche jedoch zu keinem abschließenden Ergebnis kommen konnten.

## Hintergründe

Die Thermografie ist eine bildgebende Methode, um Temperaturunterschiede abzubilden. Diese findet in vielen Disziplinen ihre Verwendung. Bei der passiven Methode werden Temperaturunterschiede die vom Körper ausgehen grafisch dargestellt, ohne diesen vorher zu manipulieren. Die aktive Thermografie erweitert diese Methode

um einen zusätzlichen Schritt. Zunächst wird das Bauteil oder der zu untersuchende Gegenstand auf eine gewisse Temperatur (je nach Untersuchung) erwärmt. Da unterschiedliche Gegenstände verschiedene Abkühlverhalten aufweisen, welche von ihrem Wärmedurchgangskoeffizienten abhängig sind, können Temperaturunterschiede grafisch abgebildet werden. Die Nahrungsmittelindustrie nutzt diesen Prozess beispielsweise um Fremdkörper aufzuspüren, bevor Produkte verpackt werden.

Auf Baustellen werden immer öfter Elementwände eingesetzt. Dies sind Halbfertigteile, die vor Ort mit einem Kern aus Ort beton vergossen werden. So wird eine sehr schnelle Fertigstellung erreicht. Wird dieser

Beton jedoch nicht richtig verdichtet, kann es zu fehlendem Verbund zwischen Ortbeton und Fertigteil kommen, was eine oder mehrere undichte Stellen nach sich zieht. Im Zuge einer Arbeit wurden mittels dieser Methode verschiedene Probekörper angefertigt. Dies waren zum einen kleinformatige Handstücke, die durch ihre beschränkte Größe gut geeignet sind, um im Labor verschiedene Versuche durchzuführen.

Ziel dieser Masterarbeit war es, das Verfahren dahin gehend zu optimieren, dass im Labor Versuche durchgeführt werden können, die zuverlässige Ergebnisse liefern. Die an den kleinen Handstücken durchgeführten Versuche sollen anschließend auf großformatige Proben übertragen werden und hier die Durchführbarkeit bestätigt werden.

In den Versuchen wurde ein Zustand angenähert, wie er in der Wand aufzufinden ist. Hier wird lediglich ein beschränkter Bereich der Wand betrachtet, der an den angrenzenden Bereich nur bedingt Wärme abgibt.

Zusätzlich wurde ein großes Elementwandstück vollständig ausgegossen. Hier können Versuche ausgeführt werden, die den Randbedingungen einer echten Wand näher kommen. In der Masterarbeit wurde zunächst die Ausführbarkeit ohne Wasser geprüft, sobald sich ein regelmäßig reproduzierbarer Zustand erreichen ließ, wurde eine Störstelle mit Wasser eingebracht.

## Versuchsanordnungen



Abb. 1: trockener Probekörper

Bei den Handstücken handelt sich um eine Betonplatte der Maße 25 x 40 cm, die aus einer

zweischichtigen Wand herausgeschnitten wurde. Die Frontplatte ist 5 cm stark, die hintere 7 cm. Der Körper steht auf dem Fußboden und wird aus 50 cm Entfernung mit einem Heizstrahler der mit einer Leistung von 1800 W angestrahlt. Die Platte befindet sich in der Schalungsbox und ist darin von 2 cm Styrodur umgeben (s. Abb. 1).

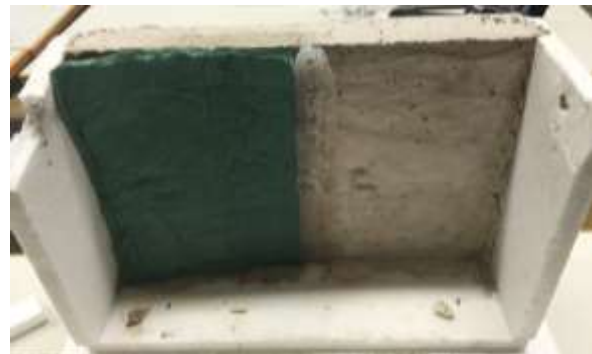


Abb. 2: Probekörper mit Störstelle

Dieser Versuchsaufbau soll die Erkenntnisse der vorherigen Versuche zusammenfassen und die Anwendbarkeit des Erwärmungsprozesses für den gegebenen Wandaufbau bestätigen. Der Versuch stellt einen Wassereintritt in die Wand dar. Zwischen den zwei Platten wird ein Taschentuch eingelegt, das über mehrere Stunden feucht gehalten wurde. So wird der tatsächliche Zustand in Gebäuden simuliert, da hier das Wasser über mehrere Tage oder Wochen steht und so für eine maximale Sättigung im Körper sorgt. Während der Einwirkphase wurde der Körper mittels einer Styroporplatte abgedeckt, um die Verdunstung zu minimieren. Das Taschentuch wurde mehrmals neu angefeuchtet, um die Sättigung zu maximieren.

## Auswertungsmethodik

Die mit der Thermografiekamera aufgenommenen Bilder werden so abgespeichert, dass jeder Pixel den Temperaturwert der entsprechenden Stelle beinhaltet. Die Daten werden von der FLIR Software Quickreport ausgelesen, welche die Werte an Microsoft Excel übergibt. Hier wird eine Tabelle angelegt, die 320 Spalten breit und 240 Zeilen groß ist, was

der Auflösung der Kamera entspricht. In jeder Zelle ist die entsprechende Temperatur aufgelistet. Um einen Überblick über die Qualität des Versuches zu gewinnen, wurden Werte an verschiedenen Stellen verglichen. Hierfür wurde ein Wert in der Mitte des Körpers gewählt und mit einem Wert auf gleicher Höhe im Randbereich gegenübergestellt. Zusätzlich wurde ein Wert an der Unterkante des Körpers mit einem Wert auf gleicher Höhe am Rand verglichen. So kann festgestellt werden, ob eine gleichmäßige Erwärmung erfolgt ist. Diese Werte wurden in einem Diagramm über längere Zeit aufgezeichnet, so dass grafisch ersichtlich wird, ob ein Temperaturunterschied zwischen Rand und Mitte vorhanden ist. Zusätzlich wurde die Differenz über die Zeit dargestellt. So ist ein Trend erkennbar, ob sich die Temperaturunterschiede im Laufe der Abkühlphase vergrößern und falls dem so ist, in welchem Maße. Sollte hier ein zu hoher Unterschied feststellbar sein, lässt sich daraus schließen, dass die Wärmeabflüsse über die Ränder immer noch zu stark stattfinden. In Abb.3 ist dargestellt, wie sich der Temperaturverlauf über den Körper darstellt. So entspricht der linke Rand des Diagramms der linken Seite des Betonkörpers und man kann erkennen, dass auf der rechten Seite die Temperatur stark abfällt. Dies ist der Bereich in dem das Wasser eingebracht wurde.

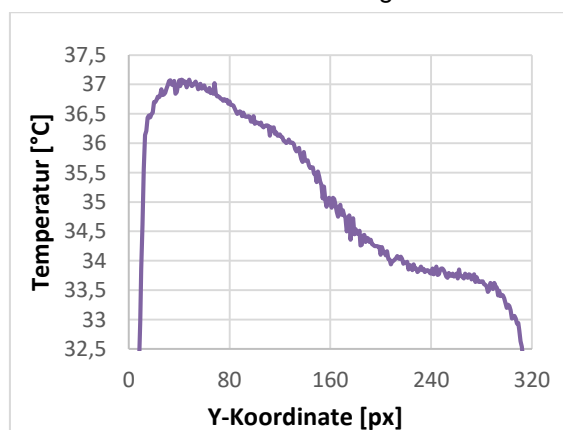


Abb.3: Temperaturquerschnitt

## Ergebnisse feuchte Handstücke

In den voran gegangenen Versuchen sollte ermittelt werden, ob das Aufspüren von Wasserstellen in den Handstücken qualitativ möglich ist. Trotz der Schwierigkeiten beim Aufheizen sowie der ungleichmäßigen Verteilung der Strahler und dem unbekanntem Austausch von Wärme in den Handstücken ist es in den letzten Versuchen gelungen, Wasser zuverlässig aufzuspüren. Dabei hat es keine Rolle gespielt, ob die Bereiche durch eine Silikonnaht voneinander getrennt waren oder ob das Wasser sich noch etwas ausbreiten konnte. Außerdem kann festgehalten werden, dass der Übergangsbereich immer größer wird, je tiefer das Wasser in der Wand verortet ist.

## Abschließendes Fazit

Die Aufgabenstellung war es, auf der einen Seite die Durchführbarkeit der Verfahren zu validieren, auf der anderen die Randbedingungen der Versuche im Labor zu optimieren.

In den Versuchen mit den trockenen Handstücken konnte keine vollständig gleichmäßige Erwärmung erreicht werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese in den Versuchen mit Feuchteintrag weniger wichtig als zunächst angenommen

Dass die Feuchtefeststellung mittels aktiver Thermografie unter Laborbedingungen möglich ist, konnte in der Arbeit gezeigt werden. So wurde an den Handstücken, die nur eine relativ kleine Fläche aufweisen, nachgewiesen, dass sich Wasser im Zwischenraum der Wandstücke und dem Porenraum befindet. Die Ergänzung der Randdämmung mit 2 cm Styrodur stellte eine erhebliche Verbesserung dar und ermöglichte eine Verbesserung der Erfassung der realen Zustände.

Das Verfahren stellt gegenüber den herkömmlichen Verfahren eine Methode dar, mit der man bei angemessener Schulung gute Ergebnisse in der Aufspürung von Wasser in Elementwänden erreichen kann. Diese Methode



ist nicht destruktiv und kann somit auch in hochwertigen Bereichen eingesetzt werden.

Die aktive Thermografie als Werkzeug im Bauwesen sollte weiter betrachtet werden. Als Zielstellung kann festgehalten werden, dass in künftigen Arbeiten die Fragestellung geklärt werden soll, wie es ermöglicht wird auch großflächige Wandstücke gleichmäßig erwärmen zu können. Die Randbedingungen wurden im Bereich der kleinformatischen Proben dahingehend optimiert, dass hier zuverlässig Wasser detektiert werden kann. Ob diese Herangehensweise auch für andere Formate einsetzbar ist, konnte im Zeitrahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Es ist in der Arbeit eine Methode

gefunden worden, mit der man eine ausreichende Genauigkeit für kleinformatische Probekörper erreichen kann. Die Wärme hat sich in diesen Versuchen zwar immer etwas verteilt und die Fehlstellen so etwas überdeckt, besser wäre es jedoch, wenn die Fehlstellen nicht Bestandteil der Aufwärmung wären.

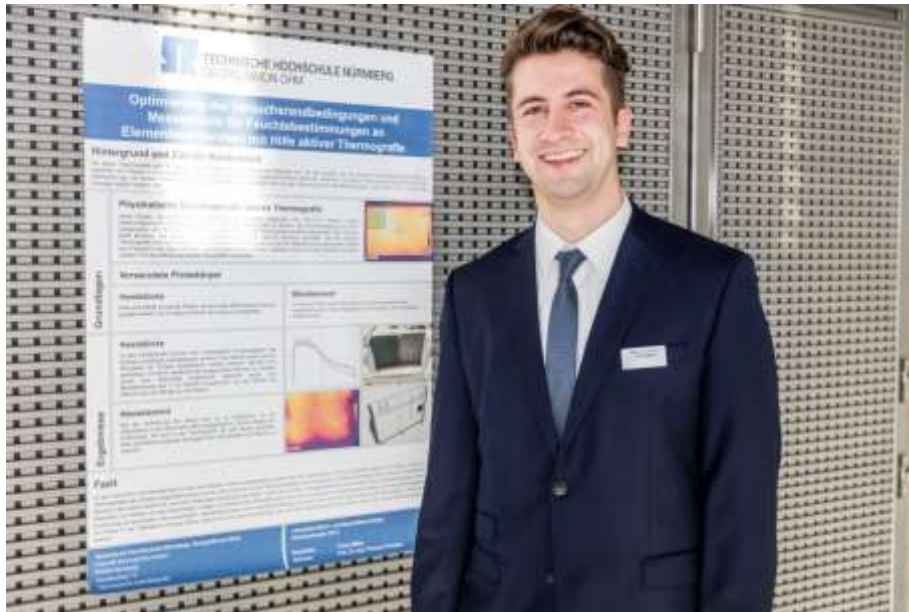
Ein langfristiges Ziel kann es sein, Rahmenbedingungen zu definieren, die abschließend auch in eine Normung übergeführt werden können und als Qualitätsparameter verwendet werden. Diese können z.B. Gleichmäßigkeit der Aufheizung, Abkühlgeschwindigkeit oder Art und Weise der Aufheizung sein.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit verwendete Quellen:

- [1] *Fouad, N.; Richter, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2006.*
- [2] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.: Berührungslose Temperaturmessung (Thermografie). [http://vds.de/fileadmin/vds\\_publicationen/vds\\_2851\\_web.pdf](http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2851_web.pdf) (Abruf: 21.06.2015)
- [3] Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.: Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2010.

Die Arbeit beruht zum größten Teil auf eigenen Ergebnissen. Die Literatur stellte lediglich die Grundlage für verschiedene Zahlenwerte dar und sind somit nicht vordergründig Bestandteil der Arbeit.



## **Autor**

Franz Mathe

Geboren 22.09.1989 in Fürth

Abitur am Wolfgang Borchert Gymnasium Langenzenn

2010-2014 Studium Bauingenieurwesen an der HS Zittau Görlitz, Abschluss Dipl.-Ing.(FH)

2014-2016 Studium Internationales Bauwesen an der TH Nürnberg; Abschluss M.Eng.

## **Betreuer**

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Beton- und Baustofftechnologie unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann an der TH Nürnberg.

# ANALYSE DER KOSTENSTRUKTUR VON BAULEISTUNGEN

## Masterarbeit

*Julia Osterried*

**Das strategische Management ist entscheidend für die Zukunft eines jeden Bauunternehmens im Hochbau. Es schafft die Basis, um künftige Unternehmensentwicklungen zu planen und mit Hilfe entworfener Maßnahmen den langfristigen Erfolg eines Betriebes zu sichern. [5, S. 4-1] Die Kenntnis über die Kostenstruktur von Bauleistungen stellt den Ausgangspunkt für die Entwicklung von leistungssteigernden bzw. kostensenkenden Maßnahmen auf strategischer Ebene dar. Zielsetzung dieser Forschungsarbeit ist es, das originäre Kostenverhalten der Leistungsbereiche im Hochbau zu ermitteln. Auf diesen Ergebnissen aufbauend werden Kostentreiber sowie ihre Wechselwirkungen untereinander im Hochbau analysiert.**

**Keywords:** Kostenstruktur, Bauleistungen, Leistungsbereich, Kostenanalyse, Einzelkosten der Teilleistungen, Kostentreiber, Strategie, Wertaktivitäten

### Motivation und Zielsetzung

Eine Analyse über die Höhe und Zusammensetzung der Kosten in einem Bauunternehmen liefert elementar wichtige Informationen. Auf Grundlage dieser Kenntnisse sind Kostenantriebskräfte diagnostizierbar. Durch eine Untersuchung dieser Bestimmungsfaktoren von Kosten kann der Kostenursache nachgegangen werden, woraus neue unternehmerische Handlungsalternativen aufgezeigt werden können. So kann ein Betrieb die Kostenstruktur seiner Wertaktivitäten durch eine Kontrolle der Kostentreiber positiv beeinflussen und letztlich seine Wettbewerbsposition am Markt verbessern. [3, S. 106-107]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die originäre Kostenstruktur der Leistungsbereiche im Hochbau ermittelt und untersucht. Dargelegte Ansprüche erfordern eine Erfassung der direkten Einzelkosten der Teilleistungen von Lohn-, Geräte- und Materialarbeiten ( $EKT_L$ ,  $EKT_G$  und  $EKT_M$ ) sowie deren Anteile an den Gesamtkosten, welche im Zuge der Leistungserbringung im Hochbau anfallen.

Neben der Kostenstrukturanalyse der Leistungsbereiche findet eine tiefergehende Untersuchung von Kostentriibern ausgewählter Bauleistungen statt. Zielsetzung ist es, die anfallenden Betriebskosten und Anlagen den entsprechenden Bauleistungen zuzuweisen. Die Gewinnung der Daten erfolgt im Rahmen der Zusammenarbeit mit einem Unternehmen.

## Analyse der Kostenstruktur der Leistungsbereiche mit Baudatenbank sirAdos

Um den Produktionsprozess im Hochbau in der Analyse abzubilden, werden vertraglich geschuldete Bauleistungen von zwei Bauvorhaben herangezogen. Einführend erfolgt die Untersuchung der qualitativen Eignung der beiden Bauprojekte für die Arbeit. Nach einer Überprüfung des Anwendungspotenzials der Bauvorhaben werden auf Grundlage ihrer Leistungsbeschreibungen die erforderlichen Bauleistungen erfasst.

Datengrundlage für die Kostenermittlung von Bauleistungen im Hochbau bildet die Baudatenbank sirAdos, welche Ausschreibungstexte sowie Baupreise und Baupreisanteile für die Leistungsbereiche im Hochbau anführt. Mit Hilfe von „sirAdos-Baudaten“ werden die Preise und Preisanteile der Bauleistungen der Projekte

erhoben. Nach Abzug einer gleichmäßigen Umlage werden die Kosten und Kostenanteile der Positionen ermittelt. Unter Einbezug des Mengengerüsts der Bauleistungen der Bauvorhaben wird der Einfluss der Positionskosten auf die gesamten Einzelkosten eines Gewerkes berücksichtigt. Abschließend werden die untersuchten Bauleistungen in Anlehnung an das Standardleistungsbuch den entsprechenden Leistungsbereichen zugeordnet.

Unter Anwendung eines technisch-ökonomischen Ansatzes zur Strukturierung eines Unternehmens nach vorherrschenden Produktionsfaktoren sind die untersuchten Leistungsbereiche in personal-, material- oder geräteintensive Gewerke kategorisierbar. [4, S. 73-74] Im Rahmen der Kostenanalyse werden so 48 Leistungsbereiche hinsichtlich ihrer dominanten Kostenanteile Lohn, Geräte und Material erfasst. Die Untersuchungsergebnisse sind Abbildung 1 zu entnehmen:

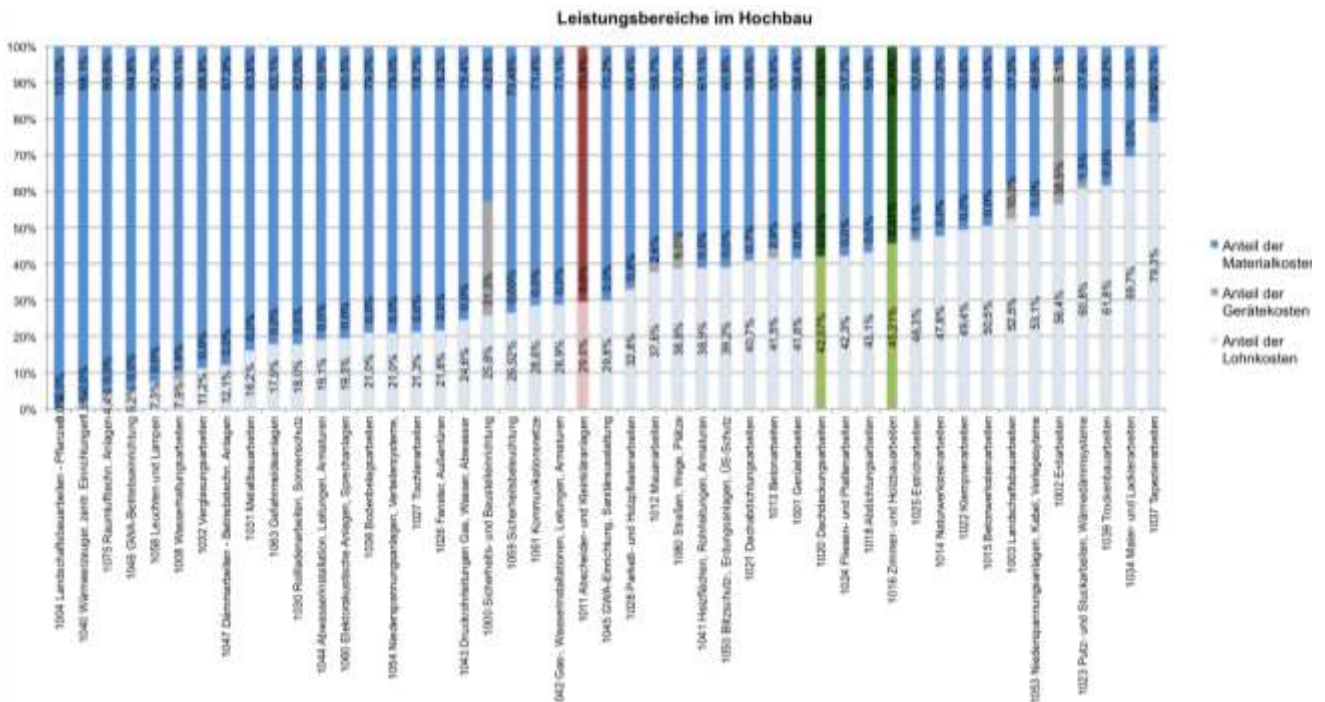


Abb. 1: Kostenstruktur der Leistungsbereiche im Hochbau

Die Analyseergebnisse zeigen eine wesentliche Dominanz der Materialkosten innerhalb der originären Wertschöpfung eines Bauunternehmens im Hochbau (vgl. Abb. 1).

Rund 80 % der untersuchten Leistungsbereiche weisen ein materialintensives Kostenverhalten, d.h. mehr als 50 % Materialkosten an den gesamten Einzelkosten der Teilleistungen auf. Ein überwiegender Anteil von Lohnkosten wurde

bei etwa 20 % der untersuchten Gewerke identifiziert. Folglich nehmen die Gerätekosten die geringste Kostenposition unter den direkten Aufwendungen ein.

Die 48 erfassten Leistungsbereiche werden nach ihrem dominanten Kostenanteil hinsichtlich den von Porter formulierten Kostenantriebskräften untersucht: Lernvorgänge, Struktur der Kapazitätsauslastung, Betriebsgrößenbedingte Kostendegression, Integration, Zeitwahl, Standort, Verknüpfungen, Verflechtungen sowie Außerbetriebliche Institutionen. [3, S. 106-107] Durch diese Auswertung kann ein Bauunternehmen unter Einbezug seiner individuellen Strategie wesentliche Informationen gewinnen, wie Kostentreiber und folglich die Kostenstruktur zum Erreichen von Wettbewerbsvorteilen zu beeinflussen sind.

### Analyse der Kostentreiber ausgewählter Bauleistungen in einem Unternehmen

In einer abschließenden Untersuchung findet eine tiefergehende Diagnose von Kostentriibern des Leistungsbereiches Erdarbeiten in einem Betrieb statt. Zielsetzung dieser Analyse ist es, die im Unternehmen anfallenden Betriebskosten und Anlagen den entsprechenden Wertaktivitäten ausgewählter Bauleistungen zuzuweisen. Um leistungssteigernde bzw. kostensenkende Maßnahmen im betrachteten Unternehmen zu identifizieren, werden die Kostenantriebskräfte der Bauleistungen ermittelt. Weiterhin wird die Wechselwirkung der erfassten Kostentreiber diagnostiziert und bewertet. Die Analyse lässt sich in die in Abbildung 2 aufgeführten Schritte unterteilen.

Eine eingangs durchgeführte SWOT-Analyse des betrachteten Unternehmens stellt den Ausgangspunkt für die Untersuchung der ausgewählten Bauleistungen dar. Im Kontext der SWOT-Analyse werden die Kernkompetenzen und Unternehmensgrundsätze des Betriebes bestimmt. Zu Beginn werden die Bauleistungen hinsichtlich externer oder interner Wertschöpfung beleuchtet. Analyseparameter sind die

strategische Bedeutung sowie die aus der SWOT-Analyse abgeleitete Wettbewerbsrelevanz der untersuchten Bauleistungen. Nachdem die Kosten den entsprechenden Wertaktivitäten zugeordnet werden, können Kostentreiber ermittelt und analysiert werden.

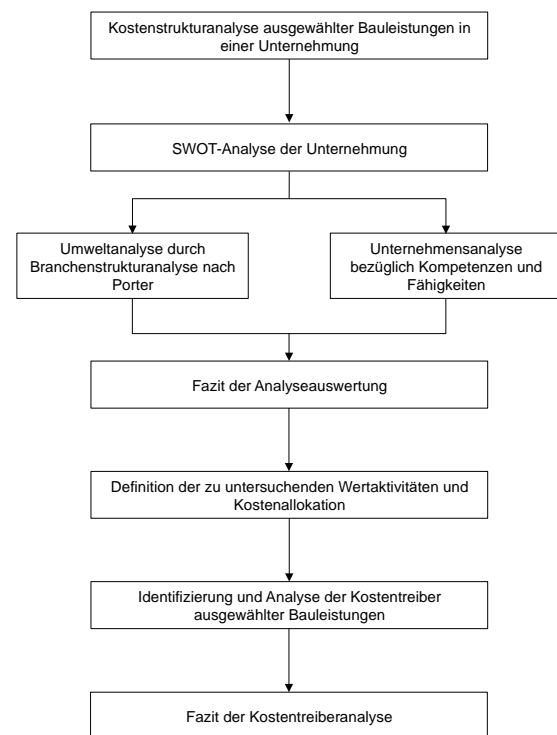


Abb. 2: Methodisches Vorgehen für Kostenstrukturanalyse ausgewählter Bauleistungen im Unternehmen

In Bezug auf Nachunternehmerleistungen ist die Verhandlungsstärke des Betriebes als übergeordnete Kostenantriebskraft zu bestimmen. Ihre Position kann im Zuge einer „Einkaufsstrategie“, z.B. durch Streuung der Einkäufe oder partielle Integration entscheidend beeinflusst werden. [2, S. 175-178]

Bei den Gerätekosten ist eine allgemeine Tendenz ihrer Kosteneinflussfaktoren zu diagnostizieren. Sowohl unternehmenspolitische „Ermessensentscheidungen“ (z.B. Höhe des Anschaffungswertes) als auch die „Betriebsgrößenbedingte Kostendegression“ (z.B. Leistung des Gerätes) korrelieren miteinander. Anschaffungswert und Vorhaltezeit bestimmen die Höhe der Gerätekosten maßgeblich.



Die Lohnkostenhöhe ist vorrangig im Zusammenhang mit der qualitativen und quantitativen Leistungsfähigkeit des „Humankapitals“ zu betrachten. Es kann eine maßgebliche Interdependenz der spezifischen Personalstruktur mit anderen Produktionsfaktoren, insbesondere mit der Struktur der Gerätekosten identifiziert werden.

In Abbildung 3 werden beispielhaft die Kostentreiber von Aushubarbeiten in einer Priorisierungsmatrix dargestellt. Die Antriebskräfte werden bezüglich ihres Einflusses auf die Kosten sowie ihrer Beeinflussbarkeit in Anbetracht der Unternehmensstrategie qualitativ bewertet.

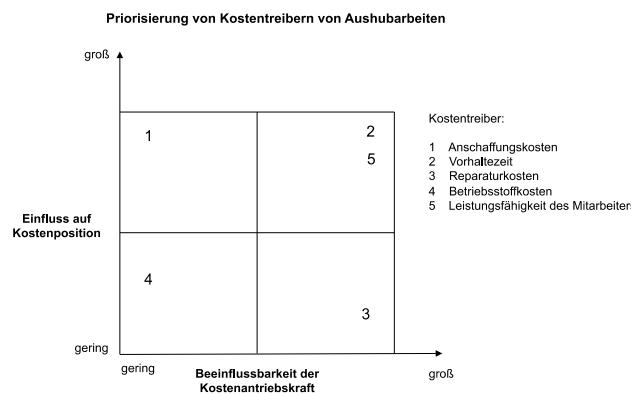


Abb. 3: Qualitative Priorisierung der Kostentreiber von Aushubarbeiten im betrachteten Unternehmen – Eigene Darstellung in Anlehnung an [1, S. 225]

## Resümee

Die in dieser Arbeit ermittelten Erkenntnisse zum Kostenverhalten der Leistungsbereiche stellen fundamentale Ansatzpunkte für weitere Kostenanalysen dar.

Bei Leistungsbereichen mit materialintensiver Kostenstruktur sollte der strategische Beschaffungsprozess eine zentrale Rolle einnehmen, um so Kostentreiber im Bereich der Lieferantenbeziehungen zu identifizieren. Ein verstärkter Fokus auf das „Humankapital“ im Betrieb ist bei Gewerken mit einer lohnintensiven Kostenposition zu legen. In diesem Untersuchungsprozess sind die qualitative und quantitative Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter sowie das unternehmensindividuelle monetäre

Anreizsystem zu hinterfragen, welche maßgebende Auswirkungen auf andere Kostentreiber aufzeigen. Bei Bauunternehmen mit geräteintensiver Kostenstruktur sind besonders die werterhaltenden Maßnahmen bezüglich ihrer Anlagen zu beleuchten, da diese große Kostensenkungspotenziale bei Gerätekosten operationalisieren.

Weiterhin ist die eminente Korrelation zwischen der Leistungserbringung und Personalstruktur intensiv zu betrachten. Die Analyse der Kostenstruktur sowohl mit einer Baudatenbank als auch auf der Grundlage tatsächlicher Daten eines exemplarischen Unternehmens decken die verstärkten Interdependenzen des „Humankapitals“ mit den Produktionsfaktoren „Betriebsmittel“ und „Werkstoffe“ auf. Die „Menschliche Arbeitskraft“ legt aufgrund ihres wechselseitigen Einflusses mit den anderen Elementarfaktoren den Grundstein für den Erfolg einer Leistungserbringung in einem Bauunternehmen.

Die Ausführungen in der Kostenstrukturanalyse zeigen, dass die Frage nach der Beschaffung von externen oder internen Produktionsfaktoren ausschließlich unter Zuhilfenahme der betriebsindividuellen Gegebenheiten, Ziele sowie der daraus abgeleiteten Strategie geklärt werden kann. Die spezifische Unternehmenspolitik bestimmt die Zielsetzung und letztlich die identifizierten kostenwirksamen Strukturfaktoren im baubetrieblichen Kostenmanagement. Auf Grundlage der Analyseergebnisse in dieser Forschungsarbeit wird im Zusammenhang mit der individuellen Unternehmenspolitik der Prozess zur „Make-or-buy-Entscheidung“ in einer Bauunternehmung unterstützt.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Hungenberg, Harald: Strategisches Management in Unternehmen – Ziele - Prozesse - Verfahren. 8 Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. 2014.
- [2]: Porter, Michael E.: Wettbewerbsstrategie – Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. 12. Aufl. Frankfurt a. Main: Campus. 2013.
- [3]: Porter, Michael E.: Wettbewerbsvorteile – Spitzenleistungen erreichen und behaupten. 6. Aufl. Frankfurt a. Main: Campus. 2000.
- [4] Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. 2012.
- [5]: Zimmermann, Josef: Geschäftsprozessmanagement. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. Ausgabe 04/2013.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Porter, Michael E.: Wettbewerbsvorteile – Spitzenleistungen erreichen und behaupten. 6. Aufl. Frankfurt a. Main: Campus. 2000.
2. Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. 2012.
4. Zimmermann, Josef: Geschäftsprozessmanagement. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. Ausgabe 04/2013.
5. Zimmermann, Josef: Ergänzungskurs Bauprozessmanagement. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. Ausgabe 04/2012.



## **Autorin**

Julia Osterried, geboren am 17.02.1989 in Augsburg:

10/2009 – 09/2012: Bachelorstudium des Bauingenieurwesens an der TU München

10/2012 – 07/2015: Masterstudium des Bauingenieurwesens an der TU München  
Vertiefung in den Bereichen Bauprozessmanagement, Immobilienentwicklung,  
Massivbau und Statik

08/2015 – 09/2015: Auslandsaufenthalt in Südamerika

Seit 10/2015: Wissenschaftliche Assistentin am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und  
Immobilienentwicklung

## **Betreuer**

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der TU München von Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann angefertigt und von Dipl.-Ing. Christoph Gottanka betreut.

# VERLAUF DES PHASENBESTANDS UND DER CARBONATISIERUNGSFRONT ZEMENTGEBUNDENER BAUSTOFFE UNTER VERSCHIEDENER CO<sub>2</sub>-BEAUFSCHLAGUNG

## Masterarbeit

*Simon Rumplmayr*

**Erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bewirken eine Beschleunigung der Carbonatisierung. Dadurch kann in Schnellprüfverfahren der Schnellcarbonatisierungskoeffizient als Eingangsparameter für die Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen in kurzer Zeit ermittelt werden. Allerdings liegt die tatsächliche Beschleunigung deutlich unterhalb der theoretisch berechneten, weshalb Untersuchungen zum Einfluss beschleunigter Bedingungen auf zementgebundene Baustoffe notwendig sind. Im Zuge des praktischen Teils der Abschlussarbeit wurden zementgebundene Baustoffe mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 1,15, 2,15, 4 und 10 Vol.-% beaufschlagt. Die Untersuchungen ergaben, dass es mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration zu stärkeren Veränderungen des Porengefüges, der Mikrostruktur und des Phasenbestands kam. Die Untersuchungen erweitern das Verständnis der Carbonatisierung und dienen schließlich einer besseren Praxisübertragbarkeit von Schnellprüfverfahren.**

**Keywords:** Carbonatisierung, Schnellprüfverfahren, Instandhaltung, Zementstein, Mörtel, Beton

## Einleitung

Die Carbonatisierung stellt ein Dauerhaftigkeitsproblem bei Stahlbeton dar. Sie führt zur Depassivierung der Stahlbewehrung, d.h. die Oxidschicht wird zerstört und der Schutz vor Korrosion geht verloren. Kommt es zu Korrosion, sind Risse im Beton, Betonabplatzungen und Freilegen der Bewehrung die Folgen. Ohne geeignete Instandhaltungsmaßnahmen kann der Vorgang zu Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit bis hin zum Verlust

der Tragfähigkeit führen. Um den Zeitpunkt der Depassivierung berechnen zu können, sind Vorhersagemodelle unerlässlich. Auf der Basis von Vorhersagemodellen können Instandhaltungsmaßnahmen optimal geplant werden. [1, 2]

Der sogenannte Schnellcarbonatisierungskoeffizient ist für die Vorhersagemodelle ein wichtiger Eingangsparameter und wird in Schnellprüfverfahren ermittelt. Um in kurzer Zeit den Schnellcarbonatisierungskoeffizienten zu bestimmen, wird mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gearbeitet und die

Carbonatisierung dadurch beschleunigt. Unter Berücksichtigung der für die Versuche erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lässt sich mit einem Carbonatisierungsmodell die theoretische Beschleunigung berechnen. Nach [3] liegt die tatsächliche Beschleunigung jedoch deutlich unterhalb der theoretisch berechneten. [3]

## Forschungsziel

Der Grund für die relative Abnahme der Beschleunigung wird in Veränderungen der chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie der Gefüge- und Transporteigenschaften im zementären System vermutet, die in derartiger Weise nur bei höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auftreten. Hier bedarf es einer Grundlagenforschung zur Praxisübertragbarkeit von Schnellprüfverfahren mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

Ziel der Abschlussarbeit war es, den Einfluss des CO<sub>2</sub>-Gehalts auf den Feuchtehaushalt, den Phasenbestand und das Porensystem von zementgebundenen Baustoffen zu untersuchen. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen sollte eine geeignete CO<sub>2</sub>-Konzentration für ein Schnellprüfverfahren abgeleitet werden.

## Carbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen

Die Abschlussarbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil. Der theoretische Teil wird eingeleitet durch einen Überblick über den Mechanismus der Carbonatisierung und über bisher veröffentlichte Forschungsergebnisse zum Einfluss von erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

Unsere Umgebungsluft enthält rund 0,04 Vol.-% CO<sub>2</sub> [4]. Kann gasförmiges CO<sub>2</sub> von außen in zementgebundene Baustoffe eindringen, diffundiert es hauptsächlich durch die Kapillarporen. In mit Wasser gefüllten Poren wird

die Diffusion stark behindert. Die Relevanz des Wassergehalts für die Diffusionsgeschwindigkeit wird anhand des Diffusionskoeffizienten deutlich, der im Wasser um etwa das 10.000-fache kleiner ist als im Gasraum [5]. Durch die Carbonatisierung wird chemisch-gebundenes Wasser in den Poren freigesetzt. Eine mögliche Anreicherung von freigesetztem Wasser unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und eine damit verbundene Verlangsamung der Diffusion wurden zum Gegenstand der Untersuchungen dieser Abschlussarbeit.

Die unter natürlichen Bedingungen ablaufende Carbonatisierung führt bei zementgebundenen Baustoffen zu Phasenumwandlungen und zur Abnahme des pH-Werts [6]. So carbonatisiert nicht nur das für seine Pufferwirkung bekannte Portlandit, sondern nach dessen Verbrauch auch alle weiteren calciumhaltigen Hydratphasen wie beispielsweise die C-S-H-Phasen [5, 7]. In der Literatur [8] wird berichtet, dass die C-S-H-Phasen hierbei polymerisieren, indem die Ca<sup>2+</sup>-Ionen aus den Zwischenschichten wandern und das Verhältnis von Calcium- zu Silicium-Ionen (C/S-Verhältnis) sinkt. Veröffentlichte Untersuchungsergebnisse [6] zeigen, dass es mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration zu einer stärkeren Polymerisation der ursprünglichen C-S-H-Phasen kommt.

Nach [3] könnte die Carbonatisierung zusätzlicher Zementsteinkomponenten dafür verantwortlich sein, dass die Poren stärker verstopfen. Auch würde eine stärkere Polymerisation und nicht hinnehmbare Veränderung der Mikrostruktur („C-S-H-Zerfall“) die Praxisübertragbarkeit eines Schnellprüfverfahrens in Frage stellen. Aus diesem Grund wurden die Veränderung des Phasenbestands und die C-S-H-Polymerisation in der Abschlussarbeit unter natürlichen und unter beschleunigten Bedingungen untersucht.

Nach [9] geht mit der Carbonatisierung eine Abnahme der Porosität einher. Erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bewirken im Gegensatz zur natürlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration eine schnellere Verdichtung der Poren und hemmen das

Voranschreiten der Carbonatisierungsfront in zementgebundenen Baustoffen [9].

Die Veränderungen des Porensystems von zementgebundenen Baustoffen bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurden im praktischen Teil dokumentiert.

### **Probekörper und Versuchsaufbau**

Im praktischen Teil der Arbeit wurden Zementstein und Mörtel mit jeweils einer Serie Portlandzement CEM I 42,5 R und einer Serie Hochofenzement CEM III B 42,5 N nach europäischer Norm EN 197-1 verwendet. Bei allen Proben betrug der Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) 0,50. Als Probekörper dienten Zementsteinpulver (Größtkorn  $\leq 0,2$  mm), Zementstein- und Mörtelscheiben (Dicke  $\approx 3$  mm) und Mörtelzylinder (Höhe  $\approx 72$  mm), welche vor Beginn der Versuche nahezu CO<sub>2</sub>-frei ( $\leq 0,01$  Vol.-% CO<sub>2</sub>) lagerten. Je nach Probekörper wurden ein bis vier erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ( $\leq 10$  Vol.-% CO<sub>2</sub>) für die beschleunigte Carbonatisierung gewählt. 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit (r.L.) waren als klimatische Bedingungen in den Versuchen vorgesehen. Zusätzlich kamen bei  $\leq 0,01$  Vol.-% CO<sub>2</sub> gelagerte Probekörper als Referenzproben und bei 0,05 Vol.-% CO<sub>2</sub> carbonatisierte Probekörper als natürlich-carbonatisierte Proben bei gleichen klimatischen Bedingungen (20 °C / 65 % r. L.) zum Einsatz.

### **Untersuchungsmethoden**

Das Abbruchkriterium der Pulver- und Scheibenversuche war ein pH-Wert von 8,2. Die Bestimmung erfolgte durch Besprühen des Pulvers und der gebrochenen Scheiben mit Phenolphthalein. Der pH-Wert von 8,2 äußerte sich durch einen Farbumschlag am Probenmaterial. Dadurch konnte man Proben mit gleichem Carbonatisierungsfortschritt gemessen am pH-Wert untersuchen. Die Zylinder wurden über einen Zeitraum von 28 Tagen mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt.

Der carbonatisierte Bereich (pH  $\leq 8,2$ ) eines Zylinders wurde für weitere Untersuchungen abgesägt. Es stand ein breites Spektrum an Untersuchungsmethoden für die Pulver-, Scheiben- und Zylinderproben zur Verfügung, mit denen die Veränderungen der chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie der Gefüge- und Transporteigenschaften festgestellt werden konnten.

## Ergebnisse und Ausblick

Im veranschlagten Versuchszeitraum kam es zu einer unzureichenden Carbonatisierung der CEM I-Pulverproben. Jene Versuche wurden abgebrochen und ein Probenvergleich aufgrund der unterschiedlichen pH-Werte war nicht zielführend. Da die chemisch-mineralogische Untersuchungskomponente wesentlich für die Beurteilung der Praxisübertragbarkeit erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ist, werden im Folgenden lediglich die Untersuchungsergebnisse der CEM III-Proben vorgestellt.

Am Zementsteinpulver konnten chemisch-mineralogische Veränderungen ohne Verzögerung durch lange Diffusionswege nach vergleichsweise kurzer CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung festgestellt werden. Aufgrund der geringen Partikelgröße fand eine schnelle Carbonatisierung des Probenmaterials statt. Der kristalline Phasenbestand des Pulvers wurde vor und nach der CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung mit der Röntgendiffraktometrie bestimmt. Ergänzend dazu war es mithilfe thermogravimetrischer Messungen möglich, quantitative Rückschlüsse auf den Portlandit- und Calciumcarbonat-Bestand zu ziehen. Die Untersuchungsergebnisse zeigten einen Rückgang des amorphen Anteils aufgrund der natürlichen und

beschleunigten Carbonatisierung und einen Anstieg von Calciumcarbonat. Darin lag der Grund für die Zunahme der Masse und der Reindichte, welche die Proben durch die Carbonatisierung erfuhren. An den Pulverproben konnte man mithilfe der Stickstoffadsorption Veränderungen vor allem im Gelporenbereich <50 nm feststellen. Die 4 und 10 Vol.-% CO<sub>2</sub>-Konzentrationen führten zu den stärksten Veränderungen in diesem Porenbereich und zum größten Anstieg der spezifischen Oberflächen (BET). Als Ursache wurde eine stärkere Carbonatisierung der C-S-H-Phasen vermutet, was mit der <sup>29</sup>Si-NMR-Spektroskopie bestätigt werden konnte. In den Spektren (Abb. 1) werden die Siliziumtetraeder mit Q<sup>n</sup> bezeichnet, wobei Q die Gruppe eines von vier Sauerstoffatomen tetraedrisch umgebenen Siliziumatoms repräsentiert und n die Anzahl der Verknüpfungen mit anderen Q darstellt [6]. Mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration polymerisierten die C-S-H-Phasen stärker und bei 4 und 10 Vol.-% CO<sub>2</sub> bildeten sich die größten Mengen an Ca-modifiziertem Silicagel. Dieses bildet sich bei starkem Zerfall der C-S-H-Phasen, vgl. Castellote et al. [6]. An den Scheiben und Zylindern konnten Veränderungen über die Tiefe untersucht werden.

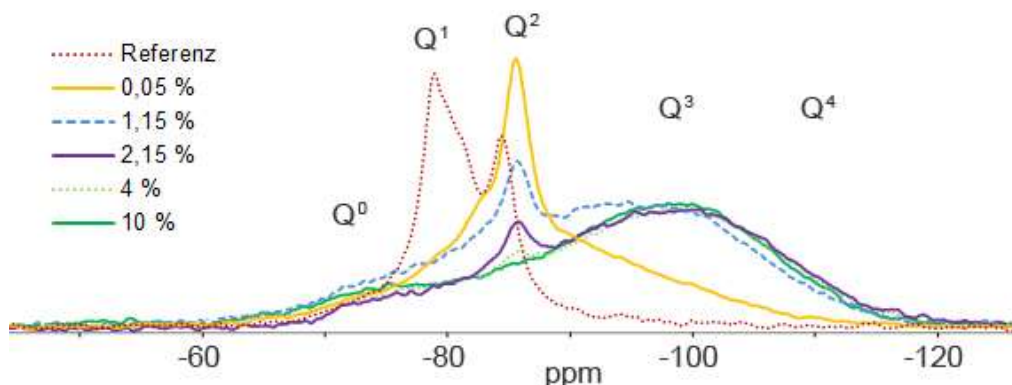


Abb. 1: <sup>29</sup>Si-NMR-Spektren der CEM III-Referenzprobe und der natürlich sowie der beschleunigt carbonatisierten CEM III-Proben. Während Q<sup>0</sup> ein Silizium-Atom beschreibt, das nur von 4 Sauerstoffatomen umgeben ist, ist Q<sup>4</sup> zusätzlich mit 4 weiteren Siliziumatomen verbunden. Eine zunehmende C-S-H-Polymerisation wird also durch Verlagerung der Peaks in den rechten Bildbereich charakterisiert.



Wie erwartet erfuhren die carbonatisierten Probenbereiche eine Abnahme der Gesamtporosität. Mit der  $^1\text{H}$ -NMR-Relaxometrie ließen sich die mit der Carbonatisierung einhergehenden, tiefenabhängigen Feuchteänderungen eruieren. Höhere NMR-Messintensitäten „hinter“ der Carbonatisierungsfront deuteten auf einen höheren Gehalt an nicht-chemisch gebundenem Wasser hin.

Da Mörtelscheiben länger carbonatisierten als Zylinderbereiche gleicher Tiefe, ist anzunehmen, dass in den Zylindern der Feuchtetransport „nach hinten“ vermutlich kein Hindernis für das Fortschreiten der Carbonatisierungsfront darstellte. Hunkeler et al. [3] sehen in der Freisetzung von chemisch-gebundenem Wasser eine mögliche Ursache für die Abnahme der relativen Beschleunigung der Carbonatisierung. Ergänzende Untersuchungen könnten die abweichende Porosität innerhalb des Probekörpers durch die Carbonatisierung und die sich einstellende Ausgleichsfeuchte berücksichtigen, um eine exakte Verortung der Wasserfront zu ermöglichen.

## Fazit

Die Untersuchungen der Abschlussarbeit zeigten, dass man bei Schnellprüfverfahren Veränderungen der chemisch-mineralogischen Eigenschaften und der Gefüge- und Transporteigenschaften eines zementgebundenen Baustoffes in Kauf nimmt. Diese Veränderungen treten bei natürlicher  $\text{CO}_2$ -Konzentration in geringerer Ausprägung auf. Mit zunehmender  $\text{CO}_2$ -Konzentration kommt es zu stärkeren Veränderungen des Porengefüges, der Mikrostruktur und des Phasenbestands.  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen  $\geq 4$  Vol.-% führen bei CEM III-Proben zu den stärksten Veränderungen und werden somit nicht als geeignete Konzentrationen bei Schnellprüfverfahren angesehen.

Die Wahl einer geeigneten  $\text{CO}_2$ -Konzentration für ein Schnellprüfverfahren ist für die Baupraxis von entscheidender Bedeutung, da damit in vergleichsweise kurzer Zeit die Schädigungswahrscheinlichkeit eines Stahlbetonbauteils gegenüber carbonatisierungsinduzierter Korrosion abgeschätzt werden kann. Durch die Berechnung des Carbonatisierungsfortschrittes und des Zeitpunkts der Depassivierung können Instandhaltungsmaßnahmen optimal und damit wirtschaftlich gestaltet werden.

**Im Text zitierte Quellen:**

- [1]: ZILCH, K. / ZEHETMAIER, G. 2010. Bemessung im konstruktiven Betonbau: Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag
- [2]: GEHLEN, C. / VON GREVE-DIERFELD, S. 2012. Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen - Empfehlungen für eine modifizierte deskriptive Bemessung, in Bergmeister, K. / Fingerloos, F. / Wörner, J.-D. (Hg.): Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz. 225-270
- [3]: HUNKELER, F. / LAMMAR, L. 2012. Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen: Forschungsauftrag AGB 2008/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB). <http://www.mobilityplatform.ch/> (09.03.2015, 10:00)
- [4]: SABINE, C.L. / FEELY, R.A. 2014. Carbon Dioxide, in North, G.R. (Hg.): Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition, Volume 2. 10-17
- [5]: STARK, J. / WICHT, B. 2013. Dauerhaftigkeit von Beton. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag
- [6]: CASTELLOTE, M. et al. 2009. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations, Materials and Structures, Vol. 42, Issue 4. 515-525
- [7]: RÖHLING, S. / EIFERT, H. / JABLINSKI, M. 2012. Betonbau: Band 1: Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [8]: VISSER, J. H. M. 2014. Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete, Construction and Building Materials, Vol. 67, Part A. 8-13
- [9]: CUI, H. et al. 2015. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms, Construction and Building Materials, Vol. 93. 522-527

**Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:**

1. HUNKELER, F. / LAMMAR, L. 2012. Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen: Forschungsauftrag AGB 2008/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB). <http://www.mobilityplatform.ch/> (09.03.2015, 10:00)
2. CASTELLOTE, M. et al. 2009. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations, Materials and Structures, Vol. 42, Issue 4. 515-525
3. MORANDEAU, A. / THIÉRY, M. / DANGLA, P. 2014. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, Cement and Concrete Research, Vol. 56. 153-170



### **Autor, Coautoren**

Simon Rumplmayr, geboren 1989 in Innsbruck

Ausbildung:

- |                   |   |
|-------------------|---|
| 04/2013 – 09/2015 | Studium der Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung<br>an der TU München (M. Sc.) |
| 10/2009 – 11/2012 | Studium der Architektur<br>an der Leopold-Franzens Universität Innsbruck (B. Sc.) |

### **Betreuer**

Dipl.-Ing. Charlotte Thiel. Sie ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am cbm · Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München. Dr. rer. nat. Harald Hilbig wertete die  $^{29}\text{Si}$ -NMR-Messungen aus und stand mir stets bei chemischen Fragestellungen zur Verfügung. Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung bei Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen an der TU München.