



DAS
BAYERISCHE
BAUWERBE

HOCHSCHULPREIS
des Bayerischen Baugewerbes

2022

WETTBEWERBSBEITRÄGE

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

Mit Beiträgen von

Helena Angerer • Sebastian Apostu • Daniel Dlubal • Simon Gradic • Michael Knüpfer •
Elisabeth Schmid • Lisa Schmidt • Ganga Surendran Sanila • Maria Wagner

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

Bildquellen

Autoren, falls nicht abweichende Angabe am jeweiligen Bild

Druck

Druck+Verlag Ernst Vögel GmbH | Kalvarienbergstraße 22 | 93491 Stamsried | www.voegel.com

München, April 2022

VORWORT

Die Stiftung Berufsförderung Bayerisches Baugewerbe schreibt jährlich den Hochschulpreis des Bayerischen Baugewerbes aus. Herausragende Bachelor- und Masterarbeiten der Fachrichtung Bauingenieurwesen mit hohem Praxisbezug für die Anwendung in Unternehmen der klein- und mittelständisch geprägten Bauwirtschaft und nachvollziehbarer, verständlicher Darstellung werden ausgezeichnet. Der Preis wurde 2022 zum 14. Mal vergeben.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Arbeiten in der von den Verfassern gelieferten Zusammenfassung in alphabetischer Reihenfolge herausgegeben. Zu jeder Arbeit gibt es ergänzende Informationen zu Verfasser, Betreuer und Auszeichnung.

In diesem Jahr wurden insgesamt zehn Bachelor- und Masterarbeiten von

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

eingereicht. Aus den zehn Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, zwei Arbeiten mit einem Geldpreis und sieben Arbeiten mit einer Teilnahmeurkunde auszuzeichnen.

Mit dem 1. Preis wurde Frau Ganga Surendran Sanila für ihre Masterarbeit „Objekt- und versionsbasierte Schlitz- und Durchbruchplanung in open BIM-Projekten mittels eines datenbankgestützten Workflows“ ausgezeichnet. In der Masterarbeit wird ein objektbasierter und datenbankgestützter Koordinationsprozess auf einer cloudbasierten Datengrundlage für die Schlitz- und Durchbruchplanung entwickelt und anhand eines aktuellen Open-BIM-Großprojekts evaluiert. Die Schlitz- und Durchbruchplanung ist zeitaufwändig und fehleranfällig. Insbesondere in Verbindung mit Planänderungen führt dies zu zahlreichen Baumängeln.

Frau Surendran Sanila leistet mit der Entwicklung des Prototyps einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung im Bauwesen, der für die Zukunft eine Perspektive aufzeigt zur Verbesserung der Planungs- und Ausführungsqualität im Baugewerbe.

Den 2. Preis erhielt Frau Helena Angerer für ihre Masterarbeit zur „Entwicklung von alternativen Methoden zur Straßenzustandserfassung“.

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Grundlagenentwicklung eines kostengünstigen Messsystems zur kontinuierlichen Überwachung des Straßenzustands. Sie ist ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung des Straßenunterhalts. Auf der Grundlage der Arbeit sind auch neue Dienstleistungsangebote von Straßenbaubetrieben denkbar.

Der 3. Preis wurde nicht vergeben.

Der Wettbewerbsausschuss:

Benedikt Baumann

Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann

Georg Gerhäuser

Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart

Thomas Schneider

Ricarda Sposito

Olaf Techmer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Inhaltsverzeichnis

Helena Angerer , Masterarbeit Entwicklung von alternativen Methoden zur Straßenzustandserfassung	Seite 3
Sebastian Apostu , Masterarbeit Prozessoptimierung in der Tiefbauplanung - Anwendung des Prozessmanagements	Seite 8
Daniel Dlupal , Masterarbeit Untersuchung des Structural Analysis Format (SAF) auf Eignung für eine BIM-gestützte Tragwerksplanung	Seite 13
Simon Gradic , Bachelorarbeit Selektive Zementaktivierung im 3D-Druckverfahren Untersuchung formoptimierbarer Bauteile im Beschuss- und Freifallversuch	Seite 18
Michael Knüpfer , Masterarbeit Analyse extremer Offensivkonzepte für den ÖPNV im ländlichen Raum	Seite 23
Elisabeth Schmid , Bachelorarbeit Mikrorissbildung im Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB)	Seite 28
Lisa Schmidt , Bachelorarbeit Untersuchungen zum Einsatz von Recyclingbetonmehl als Füller im Beton zur Verbesserung der Packungsdichte, Verarbeitbarkeit und Festigkeit	Seite 33
Ganga Surendran Sanila , Masterarbeit Objekt- und versionsbasierte Schlitz- und Durchbruchplanung in open BIM-Projekten mittels eines datenbankgestützten Workflows	Seite 37
Maria Wagner , Masterarbeit Nachträge infolge Bauzeitänderungen und Bauablaufstörungen	Seite 42

ENTWICKLUNG VON ALTERNATIVEN METHODEN ZUR STRASSENZUSTANDSERFASSUNG

Masterarbeit

Helena, Angerer

Die Masterarbeit beinhaltet die Herangehensweise an die Entwicklung einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung und legt die Erkenntnisse aus der aktuellen Entwicklungsphase dar. Die Straßenzustandserfassung erfolgt mittels Beschleunigungssensorik, indem die vertikale Beschleunigung eines Fahrzeugs während der Fahrt gemessen wird. Aus den Beschleunigungsdaten wird ein Schadensmerkmal identifiziert und die Ausbreitung des Schadens wird abgeleitet. Anschließend wird ein eigenes Messsystem aufgebaut. Um dieses Messsystem bei verschiedenen Fahrzeugen anwenden zu können, müssen fahrzeugspezifische Einflussfaktoren minimiert werden. Dazu wird ein Messaufbau konzipiert. Abschließend wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie das Messsystem auf seine praktische und wissenschaftliche Eignung geprüft werden kann.

Keywords: Straßenzustandserfassung, Straßenzustandsbewertung, Zustandsmerkmale, Beschleunigung

Ausgangslage

Die kommunale Straßenzustandserfassung umfasst aktuell sowohl Messkampagnen als auch visuelle Inspektionen. Dieses Vorgehen ist insofern nachteilig, da sich die Zustände in städtischen Gebieten schnell ändern und die Erfassung enorme personelle und finanzielle Ressourcen erfordert [1]. Aufgrund dieser periodischen Erfassung fehlt ein kontinuierlicher Überblick über die Entwicklung des Straßenzustands. Unter Anbetracht dessen, dass die Gemeindestraßen streckenmäßig rund drei Viertel des gesamten Straßennetzes in

Deutschland ausmachen [2, S. 101], ist es daher zwingend erforderlich, ein auf die kommunalen Bedürfnisse ausgerichtetes System zu entwickeln [1].

Die Thematik der Masterarbeit ist die Entwicklung eines kostengünstigen Messsystems zur kontinuierlichen Überwachung des Straßenzustands in städtischen Gebieten. Der Einsatz neuer Datenerfassungsmethoden ermöglicht eine kontinuierliche Datenüberwachung und Zustandsbewertung mit einem minimalen Personalaufwand. Dies unterstützt das Erhaltungsmanagement der Kommunen und hat Auswirkungen auf

wirtschaftliche und politische Belange. Durch die kontinuierliche Überwachung ist eine frühzeitige Schadenserkenkung möglich und die Zustandsdaten werden permanent aktualisiert. Die kontinuierliche Straßenzustandserfassung führt zu optimierten Erhaltungsstrategien anstelle von teuren Sanierungen oder Erneuerungen. Die Reduzierung des Personaleinsatzes zur Erfassung der Schäden und das frühzeitige Eingreifen hat kostensparende Effekte. Darüber hinaus kann die Nutzungsdauer einer Straße verlängert werden und die Verkehrssicherheit steigt. Insgesamt führt dies zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit sowie zu einer Steigerung der Straßenverfügbarkeit. Durch diese Innovation im Erhaltungsmanagement können die Mobilitätsanforderungen der nächsten Generationen erfüllt werden.

Bei der neuen Methode der Straßenzustandserfassung müssen GPS-, Video und Beschleunigungsdaten während der Fahrt erfasst werden. GPS- und Videodaten wurden bisher mit einer Actionkamera erfasst. Die Erfassung der Beschleunigungsdaten erfolgte vorerst durch

Smartphones und anschließend durch USB-Beschleunigungssensoren. Bei ersten Auswertungen wurde festgestellt, dass die Actionkamera nicht nur GPS- und Videodaten, sondern auch Beschleunigungsdaten aufzeichnet. Bei der Aufzeichnung aller drei Datentypen durch ein Gerät wird die Synchronisierung der Daten vereinfacht. Aus diesem Grund wurden in einer Phase der Entwicklung die Beschleunigungsmessungen mit der GoPro HERO9 Black durchgeführt und die Eignung dieser Actionkamera als Messsystem geprüft.

Eignung der GoPro als Messsystem

Es wurden drei Messfahrten mit einem VW T5 und der GoPro HERO9 Black als Messsystem durchgeführt. Der Bereich mit dem maximalen Messausschlag wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt. Darunter befindet sich ein Videoausschnitt des vorliegenden Schadens an der Stelle des maximalen Ausschlags (siehe Abbildung 1).

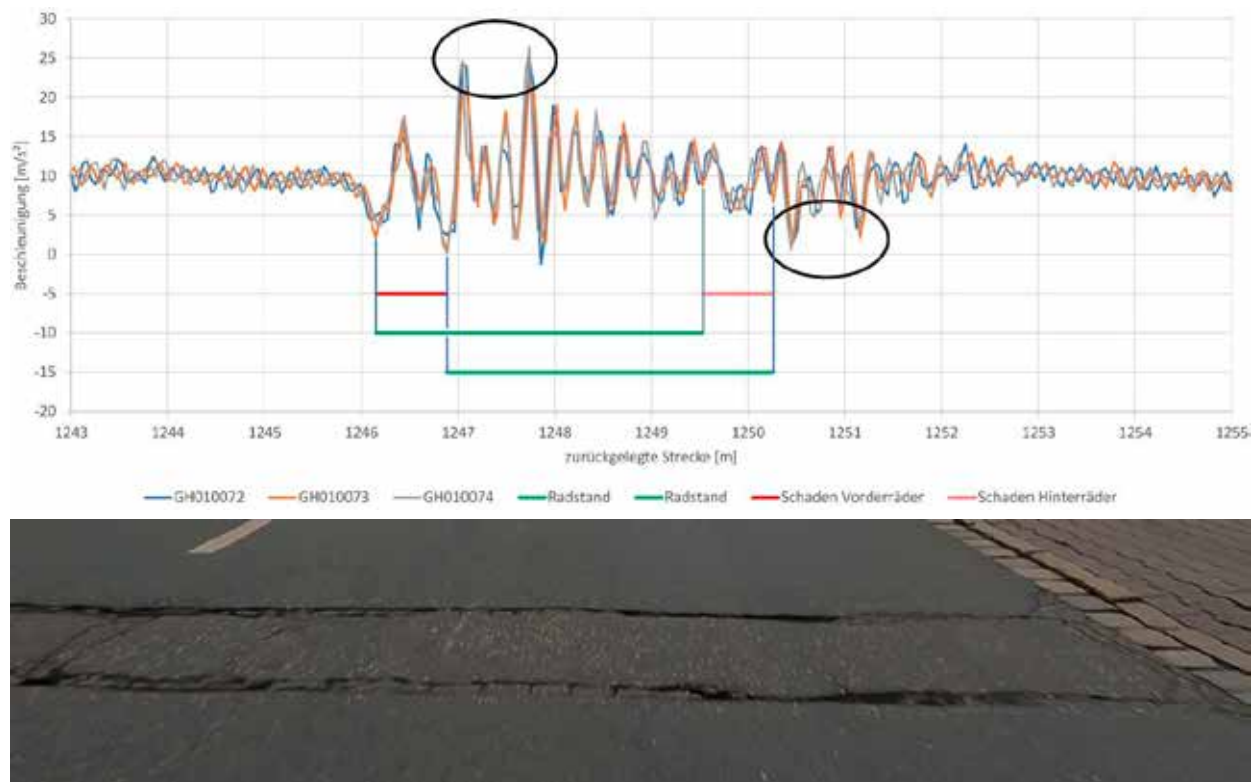


Abb. 1: Beschleunigungsdaten im Bereich eines Schadens und Videoausschnitt des Schadens

Das Diagramm zeigt auf der y-Achse die Beschleunigungswerte und auf der x-Achse die zurückgelegte Strecke in Metern. Es zeigt den Verlauf der Beschleunigungsdaten aller drei Messfahrten. Zu Beginn pendeln die Beschleunigungswerte um den Ruhewert von $9,81 \text{ m/s}^2$. Anschließend wird der Verlauf durch den Straßenschaden angeregt und erreicht bei der Datenreihe GH010073 einen Tiefpunkt bei 1246,15 m. Der nächste, ähnlich stark ausgeprägte, Tiefpunkt befindet sich bei 1246,88 m. Der Abstand beider Punkte beträgt 0,73 m. Dies entspricht ungefähr der Ausbreitung des Schadens in Längsrichtung. Die bisherigen Schwingungen wurden nur durch die Überfahrt der beiden vorderen Reifen über den Schaden angeregt. Folglich gibt es zwei weitere Extrema. Ein Tiefpunkt liegt bei 1249,52 m und ein weiterer bei 1250,26 m. Der Abstand dieser beiden Punkte beträgt 0,74 m.

Bei einem VW T5 mit einem langen Radstand beträgt dieser 3,4 m [3]. Der Abstand des ersten Tiefpunktes der Vorderräder zum ersten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,37 m und der Abstand des zweiten Tiefpunktes der Vorderräder zum zweiten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,38 m. Dies spiegelt den Radstand von 3,40 m wider. Kritisch anzumerken ist, dass die Auswirkungen der Hinterräder auf den Verlauf der Beschleunigungen ohne weitere Kenntnisse in dem Diagramm nicht ersichtlich sind. Interessant ist, dass sich die Beschleunigungen jeweils nach dem Überfahren des Schadens so überlagern, dass deutlichere Extrema entstehen. Diese Extrema sind in dem Diagramm in Abbildung 1 schwarz eingekreist. Die Abstände der Extrema spiegeln ebenfalls die Ausdehnung des Schadens in Längsrichtung und den Radstand des Messfahrzeugs wider. Diese überlagerten Extrema sind im Diagramm deutlich sichtbar und bilden eine erste Grundlage, um einen Schaden anhand der Beschleunigungsdaten identifizieren und dessen Ausdehnung in Fahrtrichtung ermitteln zu können.

In dem dargestellten Bereich wurde bei allen drei Messreihen mit einer konstanten Geschwindigkeit

gefahren. Im weiteren Verlauf der Messreihen kam es zu Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Messreihen und es konnte festgestellt werden, dass die Längsbeschleunigung des Fahrzeugs einen Einfluss auf die vertikale Beschleunigung hat. Dieses Phänomen wird in der Fahrzeugtechnik als „nicken“ bezeichnet [4].

Insgesamt eignet sich die GoPro HERO9 Black als Messsystem und kann für weitere Untersuchungen durchaus verwendet werden. Allerdings hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, wenn es weitere Informationen und Einstellmöglichkeiten an dem Beschleunigungssensor gibt. Da es bei der GoPro keinerlei Informationen über die verbauten Komponenten gibt und am Beschleunigungssensor auch keine Einstellungen vorgenommen werden können, wurde in der nächsten Entwicklungsphase ein eigenes Messsystem mit externen Sensoren aufgebaut.

Aufbau eines eigenen Messsystems

Das Messsystem wird von einem Einplatinencomputer gesteuert. In der Masterarbeit wurde hierfür ein Raspberry Pi 3 verwendet, welcher zwei Beschleunigungssensoren und ein GNSS-Modul mit einem Python Code anspricht. An dem externen Beschleunigungssensor können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden und es wird ein vollständiges Datenblatt über den Sensor zur Verfügung gestellt. Dafür kann dieser Sensor im Gegensatz zum Smartphone und der GoPro kein Standortsignal empfangen. Laut Support gibt es auch keine vorbereitete Schnittstelle, um den Sensor mit einem GNSS-Modul zu koppeln. Werden sowohl der Sensor als auch das GNSS-Modul über den gleichen Einplatinencomputer gesteuert, können alle Messwerte mit der Zeit des Rechners gespeichert und über die Zeit synchronisiert werden. Sobald ausreichend Forschungsergebnisse vorliegen, könnte die weitere Datenverarbeitung in Zukunft ebenfalls automatisiert auf dem Raspberry Pi umgesetzt werden. Das resultierende Messsystem kann dann beispielsweise in dem Fahrzeugpool einer Kommune installiert werden

und bei ohnehin anfallenden Fahrten die Straßenzustandsdaten aufzeichnen. Die Daten könnten an eine Cloud übermittelt, automatisch ausgewertet und aufbereitet zur Verfügung gestellt werden. Aktuell wird das Messsystem an einem VW T5 verwendet. Um das Messsystem in Zukunft an verschiedenen Fahrzeugmodellen verwenden zu können, müssen fahrzeugspezifische Einflussfaktoren minimiert werden.

Fahrzeugspezifische Einflussfaktoren

Um die fahrzeugspezifischen Einflüsse in Zukunft minimieren zu können, müssen diese zuerst definiert werden. In Kooperation mit der Fakultät Maschinenbau ist ein Matlab-/Simulinkmodell entstanden [5], welches ein Viertelfahrzeug simuliert. Die Simulation durch ein Viertelfahrzeug umfasst nur ein Viertel eines ganzen Fahrzeugs. Es ist ein eindimensionales Modell mit zwei Freiheitsgraden, wodurch die vertikale Bewegung eines Fahrzeugs dargestellt werden kann [4]. Bei einem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen aus der Praxis konnte festgestellt werden, dass das Modell die vertikale Beschleunigung am Radträger besser abbilden kann als die vertikale Beschleunigung der Karosserie. Dies liegt daran, dass bei den Messungen an der Karosserie das gesamte Fahrzeug mit dessen fahrzeugspezifischen Komponenten einen Einfluss auf die vertikale Beschleunigung hat.

Außerdem konnten durch mehrere Testfahrten mit dem Messfahrzeug der Fakultät Maschinenbau und anschließende Fast Fourier Transformationen (FFTs) die Eigenfrequenz des Radträgers mit 2,5 Hz und die Eigenfrequenz der Karosserie mit 13 Hz ermittelt werden. Bei Beschleunigungsmessungen am Radträger tritt die Eigenfrequenz der Karosserie nicht auf. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die Eigenfrequenzen von Radträger und Karosserie auch bei steigender Geschwindigkeit konstant bleiben.

Um die fahrzeugspezifischen Eigenschaften des VW T5 aus der Fakultät Bauingenieurwesen

ausfindig zu machen, wurde ein Messaufbau konzipiert. Für die Messfahrten soll ein Beschleunigungssensor am Radträger und ein zweiter Sensor im Fahrzeuginnenraum befestigt werden (siehe Abbildung 2).



Abb. 2: Messaufbau mit zwei Beschleunigungssensoren

Die Sensoren sollten dabei weitestgehend übereinander verbaut werden, damit die Messergebnisse nicht durch die Lage beeinflusst werden. Verschiedene Ergebnisse bei den Messungen können nur auf die Höhendifferenz der Sensoren und vor allem auf die beteiligten Fahrzeugkomponenten zurückgeführt werden.

Fazit und Ausblick

Bevor ein neues Messsystem, beispielsweise das mit dem Raspberry Pi, in der Straßenzustandserfassung verwendet werden kann, muss dessen Eignung geprüft werden. Ein Vorgehen, wie die praktische und wissenschaftliche Eignung der Beschleunigungssensorik zur Straßenzustandserfassung geprüft werden kann, wird am Ende der Masterarbeit dargelegt. Beispielsweise können die Daten einer aktuellen ZEB als Referenz dienen, um die Validität der Beschleunigungssensorik zu prüfen. Messdaten sowie Referenzdaten einer ZEB stehen zur Verfügung, um im Rahmen eines weiteren Projekts die Validierung der Forschungsergebnisse durchführen zu können.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012)“, Köln, 2012.
- [2]: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hg., „Verkehr in Zahlen 2020/2021“, Flensburg, 2020.
- [3]: Volkswagen Nutzfahrzeuge, Der neue Transporter, Preisliste und Technische Daten, Gültig für das Modelljahr 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://docplayer.org/20533471-Preisliste-und-technische-daten-gueltig-fuer-das-modelljahr-2016-der-neue-transporter-nutzfahrzeuge.html> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [4]: S. Breuer und A. Rohrbach-Kerl, „Fahrzeugdynamik: Mechanik des bewegten Fahrzeugs“, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [5]: N. Schmeller und T. Schöne, „Beurteilung der Fahrbahnqualität auf Basis von Fahrzeugmessungen und Adaption eines digitalen Zwillings in Matlab / Simulink“. Masterprojekt in der Fahrzeugtechnik, Nürnberg, 16. August 2021.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012)“, Köln, 2012.
2. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Arbeitspapier Nr. 9 Reihe K: Kommunale Straßen, Abschnitt K 2: Zustandserfassung, Unterabschnitt K 2.1: Vorbereitung und Durchführung der messtechnischen Zustandserfassung für innerörtliche Verkehrsflächen“, Köln, 2016.
3. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“, Köln, 2018.

Autor

Helena Angerer, M.Eng., Studium an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
03/2020 - 01/2022: Masterstudiengang Urbane Mobilität
10/2016 - 03/2020: Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen

Betreuer

Berthold Best, Prof. Dipl.-Ing.
Roland Kraus, Prof. Dipl.-Ing.

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der TH Nürnberg angefertigt.

Die Arbeit wurde mit dem 2. Preis ausgezeichnet.

PROZESSOPTIMIERUNG IN DER TIEFBAUPLANUNG

ANWENDUNG DES PROZESSMANAGEMENTS

Masterarbeit

Sebastian Apostu

Im Zuge der aktuellen Arbeitsmethoden in der Tiefbauplanung sind aufwendige Zwischenschritte in und zwischen den einzelnen HOAI Leistungsphasen notwendig, die überdies äußerst fehleranfällig sind. Von der Grundlagenermittlung im Außendienst über die CAD-Planung bis hin zur Ausschreibung in iTWO gibt es neuralgische Punkte, die es durch Anwendung passender Softwarelösungen zu minimieren gilt. Der Projektablauf bedarf einer Analyse durch das Prozessmanagement, um eine Prozessoptimierung zu erreichen. Dementsprechend werden im Rahmen dieser Masterarbeit Methoden vorgestellt, die den Planungsablauf im Tiefbau verschlanken. Das Ziel ist in Summe der Datengewinn, die Ersparnis an Kosten durch schnellere Arbeit sowie die Steigerung der Qualität. Aktuell herrscht noch eine überwiegende Trennung zwischen 3D-Modell und Kosten- sowie Terminplanung. Diese Schnittstellenproblematik gilt es zu lösen, sodass der Projektablauf in einem angestrebten BIM 5D-Prozess erfolgen kann.

Keywords: Prozessmanagement, Prozessoptimierung, Tiefbauplanung, BIM 5D-Prozess, Change-Management, Digitalisierung im Bauwesen, Schnittstellen, Softwarelösungen, Breitbandplanung, LWL

Relevanz dieser Masterarbeit

Grundlage für eine erfolgreiche Abwicklung eines Bauprojekts aus unternehmerischer Sicht ist die kontinuierliche Identifikation und Optimierung von Fehlerquellen in vorhandenen Workflows. Um zu wissen, an welchen Stellen optimiert werden kann und muss, wird der gesamte Projektablauf analysiert. In der aktuellen Tiefbauplanung in mittelständischen Unternehmen werden bereits diverse Arbeitsmethoden bzw. Softwareprogramme verwendet, um effizient und damit konkurrenzfähig zu bleiben. Aufgrund der

rasanten Entwicklung der Digitalisierung im Bauwesen gibt es jedoch ein breites Portfolio an Produkten, die es auf Funktionalität hinsichtlich der Arbeitserleichterung näher zu betrachten gilt. Voraussetzung dafür ist die Beurteilung des Mehrwerts während der Anwendung. Die Zukunft stellt der BIM 5D-Prozess (Kopplung der Leistungs-, Kosten- und Terminplanung) dar, der anhand einer erhöhten Planungssicherheit und Qualität das Bauwesen revolutionieren soll.

Neben der Funktionalität einzelner Softwareprogramme gehört außerdem die

Bereitschaft der Projektbeteiligten bzw. Mitarbeiter im Unternehmen, sich zu verändern, dazu. Wie wird demnach Akzeptanz für Umstrukturierungen im Unternehmen geschaffen?

Die im Zuge dieser Masterarbeit erarbeiteten Erkenntnisse sollen genutzt werden, um die zukünftige Tiefbauplanung im deutschen Bauwesen im Hinblick auf die Effizienz zu optimieren.

Vorgehensweise

Aufgrund der Kooperation mit einem mittelständischen Planungsbüro orientiert sich die Prozessanalyse dieser Masterarbeit stark an den dort verwendeten Arbeitsweisen und Programmen. Während zu Beginn ausgewählte Grundlagen für den Projekterfolg erläutert werden, wird darauffolgend der klassische Planungsablauf im Tiefbau anhand eines Prozessmodells am Beispiel eines Ingenieurbüros aus dem deutschen Mittelstand vorgestellt. Daraus lassen sich einzelne revisionsbedürftige Workflows identifizieren und näher betrachten.

Nach der Analyse startet die Optimierung einzelner Workflows mit verschiedenen Softwaretools, wobei der Schwerpunkt auf DBD-BIM (Dynamische Baudaten) liegt. Die vorliegende Masterarbeit deckt vor allem die Anwendbarkeit dieses Programms in der Tiefbauplanung auf. Das Plug-in für Autodesk Civil 3D soll die Schnittstelle zwischen der Planung und der AVA (Ausschreibung, Vergabe, Abrechnung) herstellen und insbesondere das Problem der automatisierten Mengenermittlung lösen.

Des Weiteren stellen die Untersuchung und Auswertung der Bereitschaft von Mitarbeitern für Veränderungen einen aufschlussreichen Teil dar. Daraus resultierende Erkenntnisse fließen in die Darstellung von Hürden bei der Einführung neuer Arbeitsmethoden mit ein.

Problemstellung und Ziele

Grundlage ist, den Ist-Zustand im Prozess der Tiefbauplanung eindeutig zu identifizieren und eine Bewertung vorzunehmen. Infolgedessen lassen sich Veränderungen bzw. Optimierungspotenziale im Projektablauf erkennen. Sollten aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums einer Software Funktionen zur Optimierung noch nicht praxistauglich sein, so ist ein theoretischer Weg zum Soll-Zustand aufzuzeigen. Dieser Umstand soll das Unternehmen in die Position bringen, auf Basis des Prozessmanagements im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit in Zukunft aktiv zu werden bzw. erfolgsversprechende Ansätze zu verfolgen.

Wie ist demnach der momentane Planungsablauf im Tiefbau zu bewerten und an welchen Stellen kann dieser Prozess unter Anwendung des Prozessmanagements in Richtung des BIM 5D-Prozesses optimiert werden?

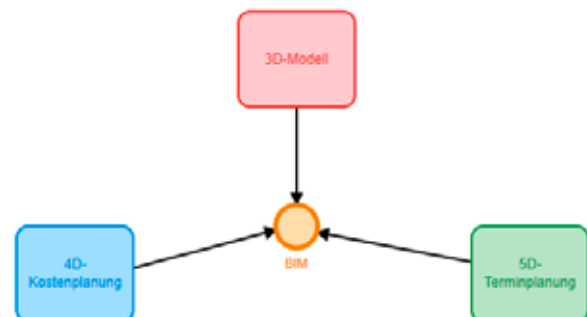


Abb. 1: BIM 5D-Prozess

Eine weitere Herausforderung liegt neben der Suche nach der passenden Anwendungssoftware in der Motivation des Mitarbeiters, sich auf neue ihm unbekanntes Techniken einzulassen. Inwieweit lassen sich darauf beziehend Veränderungen im Unternehmen erfolgreich herbeiführen?

Idealerweise sollen die im Verlauf der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit erlangten praktischen Erfahrungen verwendet werden, um auftretende Leitfragen des Prozessmanagements zu beantworten. Die Perspektive, abschließend

das erlangte Wissen zu nutzen, um ein Fazit bzgl. der Anwendung des Prozessmanagements ziehen zu können, wird angestrebt. Herausforderungen während der Umsetzung lassen sich damit realistischer bzw. objektiver einschätzen.

Das theoretische Lösungskonzept

Um einen Eindruck von der potenziellen Leistungsfähigkeit der schwerpunktmäßig im Rahmen dieser Masterarbeit untersuchten DBD-BIM Software zu erhalten, wird in dieser Masterarbeit ein theoretisches Konzept am Beispiel eines Referenzprojekts vorgestellt. Dieses Konzept beinhaltet Lösungen zur Umgehung diverser Anwendungsproblematiken.

Im Zuge des Referenzprojekts beabsichtigt der Antragsteller (Telekommunikationsunternehmen) ein LWL Kabel (z.B. mit 96 Fasern) im Schutzrohr (z.B. PE-HD 3 x 50 x 4,6 mm) in offener und geschlossener Bauweise im öffentlichen Straßengrund herzustellen. Das Telekommunikationsunternehmen ist ein gelisteter Wegerechtsinhaber gemäß dem Telekommunikationsgesetz (TKG) und beauftragt ein Ingenieurbüro für die Planung. Das LWL-Kabel dient der Anbindung eines Mobilfunkstandorts sowie diverser Verstärkerpunkte an das durch den Antragsteller betriebene Versorgungsnetz. Gegenstand dieser Genehmigungsplanung ist die Verlegung des LWL-Kabels, der zugehörigen Schutzrohre und der neuen Schächte. Außerdem muss an einigen Stellen das Baugelände vorbereitet werden. Die Überdeckung der Schutzrohre soll bei offener Bauweise ca. 0,8 m betragen und mit einem Trassenwarnband 0,3 m über dem Rohrscheitel gekennzeichnet werden. Im Bereich der geschlossenen Bauweise soll die Rohrtrasse mit einer Mindestüberdeckung von 1,5m hergestellt werden. Als Kabelschächte sind beispielsweise PII-Schächte mit den Außenmaßen 1840 x 560 mm vorgesehen.

Das Konzept spiegelt den optimierten Prozess (BIM 5D-Prozess) wider, wenngleich dafür noch einige Softwarefehler vom Hersteller behoben werden müssen. Das Konzept umfasst die theoretische Verwendung der Produkte Autodesk Civil 2022, DBD-BIM, RIB iTWO 2020 bzw. 5D 2021 und Powerproject.

Ergebnisse des Prozessmanagements

Nachdem das Prozessmanagement im Rahmen dieser Masterarbeit angewendet wurde, erfolgt im nachfolgenden Teil dieser Kurzfassung eine Vorstellung der wesentlichen Leitfragen mitsamt ihren Antworten.

Konnten Probleme identifiziert werden?

Diese Leitfrage lässt sich eindeutig bejahen. Im Zuge der Anwendung des Prozessmanagements wurden zu Beginn die konventionellen Workflows der Projektentwicklung im Tiefbau in einem Prozessmodell dargestellt. Auf Grundlage dessen konnten revisionsbedürftige Workflows analysiert und infolgedessen Probleme identifiziert werden. Die Aufdeckung und Erläuterung von Problemen war die Voraussetzung für die weitere Durchführung der Prozessoptimierung.

Wurden Optimierungspotenziale erkannt?

In Verbindung mit der Identifikation von Schwachstellen traten direkterweise Optimierungspotenziale in der Planung auf, die erläutert wurden. Ebenfalls wurde vorausgeblickt, an welchen Stellschrauben das Prozessmanagement mit welchen Werkzeugen ansetzen muss, um eine Verbesserung zu erreichen. Der Fokus lag hierbei auf dem großen vorhandenen Potenzial, einen Schritt in Richtung BIM 5D-Prozess zu gehen.

Sind die Ziele erreicht worden?

Der Ist-Zustand im Prozess der Tiefbauplanung konnte identifiziert und bewertet werden.

Notwendige Veränderungen bzw. Optimierungspotenziale im Projektablauf ließen sich im Rahmen dieser Masterarbeit erkennen. Des Weiteren wurde neben den bereits funktionierenden Optimierungen ein Weg zum Soll-Zustand aufgezeigt. Verbesserungen bzw. Optimierungspotenziale sind nun offengelegt worden und bringen das Unternehmen in die Position, auf Basis des Prozessmanagements im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit aktiv zu werden. Der Grundstein für eine erfolgreiche Zukunft ist gelegt.

Wo kann in Zukunft bei der Weiterführung der Prozessoptimierung angesetzt werden?

Angesetzt werden kann zukünftig an den nun bekannten Fehlerquellen der DBD-BIM Software. Der Kontakt zwischen dem Ingenieurbüro und dem Anbieter der Software sollte zeitig hergestellt werden, um sich hinsichtlich der Softwareentwicklung miteinander abzustimmen. Die Erkenntnisse der vorliegenden Masterarbeit können genutzt werden, um speziell auf den Tiefbau bezogene Softwarelösungen zu erhalten. Im nächsten Schritt sind außerdem weitere Mitarbeiter in die Prozessoptimierung mit einzubeziehen, um den vorgestellten PDCA-Zyklus (siehe Abbildung 2) vollumfänglich zu durchlaufen. Der Kreislauf startet dabei mit der Festlegung der Unternehmensstrategie in der Planungsphase (PLAN), ehe die Umsetzung im Zuge der Durchführungsphase (DO) erfolgt. Nach der Kontrollphase (CHECK) müssen gegebenenfalls neue Ansätze in der Verbesserungsphase (ACT) formuliert werden. Voraussetzung für dieses Prozessmanagement ist der Erhalt aller notwendigen Lizenzen oder Demoversionen der gewünschten Programme.



Abb. 2: PDCA-Zyklus

Neben den untersuchten Softwareprogrammen sollte zusätzlich eine Untersuchung hinsichtlich des Mehrwerts weiterer Lösungen, z.B. der kostenlosen Geoinformationssoftware QGIS erfolgen. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der heutigen Softwareentwicklung sollte der leitende Planer bzw. Ingenieur jederzeit offen für Neues sein und damit neue Perspektiven entwickeln.

Herausforderungen

Ein weiterer Aspekt bezüglich der zukünftigen Weiterführung dieser Prozessoptimierung ist die Reaktion der Mitarbeiter auf die geplanten Veränderungen. Auf Basis der erlangten Kenntnis über die hohe Bedeutung der Kommunikation und des Mitspracherechts sollte vonseiten der in Arbeitskreisen organisierten leitenden Mitarbeiter feinfühlig an den Veränderungsprozess herangegangen werden. Hier erfolgt die Empfehlung, Arbeitskreise mit flachen Hierarchien zu bilden, die sich mehrmals pro Woche gleichermaßen über die gemachten Erfahrungen während der Anwendung der vorgestellten Software austauschen. Somit können Mitarbeiter selbstbestimmend auf den Veränderungsprozess Einfluss nehmen. Die Konsequenz ist, dass das Unternehmen mit der Akzeptanz der Mitarbeiter die Herausforderung des Change-Managements somit erfolgreich absolviert.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Hanschke, Inge; Lorenz, Rainer: Strategisches Prozessmanagement - einfach und effektiv. Ein praktischer Leitfaden. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG (2021) (Hanser eLibrary).
2. Olavarria, Marco: Agile Prozessoptimierung. 1. Aufl. München: Verlag Franz Vahlen (2021).
3. Stolzenberg, Kerstin; Heberle, Krischan: Change Management. Veränderungsprozesse erfolgreich gestalten - Mitarbeiter mobilisieren. Vision, Kommunikation, Beteiligung, Qualifizierung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (2021) (Springer eBook Collection).

Autor

Eingereicht von:

Sebastian Apostu
Matrikelnr. 03706519
im Wintersemester 2021/22

Abgabe: 21.01.2022

Master Bauingenieurwesen (M.Eng.)
Schwerpunkt Ingenieurbau

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät 02, Bauingenieurwesen an der Hochschule München.
Betreut wurde diese Masterarbeit von Prof. Dipl.-Ing. T. Clausen.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNG DES STRUCTURAL ANALYSIS FORMAT (SAF) AUF EIGNUNG FÜR EINE BIM-GESTÜTZTE TRAGWERKSPLANUNG

Masterarbeit

Daniel, Dlubal

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das für die Statik zugeschnittene Structural Analysis Format (SAF) auf Eignung für eine BIM-gestützte Tragwerksplanung zu untersuchen. Dazu wird anfangs das Thema BIM allgemein im Zusammenhang mit der Tragwerksplanung eingeordnet, wobei auch wichtige Aspekte der Tragwerksanalyse beleuchtet werden. Anschließend werden die gebräuchlichsten Schnittstellen für die Tragwerksplanung vorgestellt, die bei einem BIM-basierten Datenaustausch von Statikmodellen verwendet werden. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die Zusammenarbeit von Architekten und Tragwerksplanern gelegt. Im Hinblick auf die Interoperabilität werden verschiedene Varianten des Datentransfers zwischen CAD- und Statikprogrammen aufgezeigt. Zu jeder dieser Schnittstellen werden Vor- und Nachteile sowie deren Chancen und Schwierigkeiten diskutiert. Um die Ausgangsfrage bezüglich der Verwendbarkeit des SAF-Formats zu beantworten, wird im Rahmen mehrerer Datenaustausch-Szenarien festgestellt, dass das SAF für einen BIM-orientierten Austausch von statisch relevanten Daten auf einem guten Weg ist und in Zukunft mit weiteren Verbesserungen zu rechnen ist. Abschließend wird die Masterthesis mit einem übersichtlichen Leitfaden für eine BIM-basierte Tragwerksplanung ergänzt. Dieser gibt dem Leser elementare Empfehlungen, um erfolgreich an einem BIM-Projekt teilzunehmen.

Keywords: BIM, Tragwerksplanung, SAF, IFC, Schnittstellen, Datenaustausch, Statikmodell

1. Einführung

Open BIM soll die beste Lösung für eine softwareunabhängige Zusammenarbeit zwischen den Fachplanern sein. Das kann für die meisten Anwendungsfälle sogar stimmen, findet jedoch aktuell beim Datenaustausch von Informationen zwischen Architekten und Statikern so gut wie gar

nicht statt. Oft scheitert es an mangelhaften Austauschergebnissen, unzureichender Übermittlung von Strukturdaten sowie ständigen manuellen Nachbesserungen nach einem Import mit dem offenen Austauschformat IFC. [1] [2]

Bei der ständigen Weiterentwicklung des IFC-Formats, angetrieben von der Organisation

buildingSMART, werden die Aspekte der Tragwerksplanung häufig außer Acht gelassen. So bieten nicht einmal alle Softwarehersteller einen Import bzw. Export des IFC-Formats an, da die Implementierung zu aufwendig ist. Ein neues offenes Format, eigens auf die Tragwerksanalyse zugeschnitten, soll in Zukunft Abhilfe schaffen.

Auf Initiative der Nemetschek Group wurde das auf Excel basierte offene Austauschformat SAF (Structural Analysis Format) entwickelt. Es soll die Arbeit für Statiker wesentlich vereinfachen, da es für Statikprogramme besser gelesen und geschrieben werden kann. Somit kann eine bessere Informationsübertragung von nativen Daten sichergestellt werden.

2. BIM in der Tragwerksplanung

Modelle in der Tragwerksplanung

Insgesamt beschäftigen sich Tragwerksplaner in ihrer Arbeit mit drei unterschiedlichen Hauptmodellen. Die *Abbildung 1* zeigt einmal das klassische Fachmodell der Tragwerksplanung, das auch als physikalisches Strukturmodell fungiert. Auf der anderen Seite besteht mittlerweile in vielen CAD-Applikationen auch die Möglichkeit, idealisierte Analysemodelle automatisch bei der Modellbildung eines Gebäudes zu erstellen. Dieses kann dann weiter an die Statikprogramme übergeben werden, wobei die Anwender mit FEM- und Berechnungsmodellen ihre statischen Berechnungen und Bemessungen durchführen.

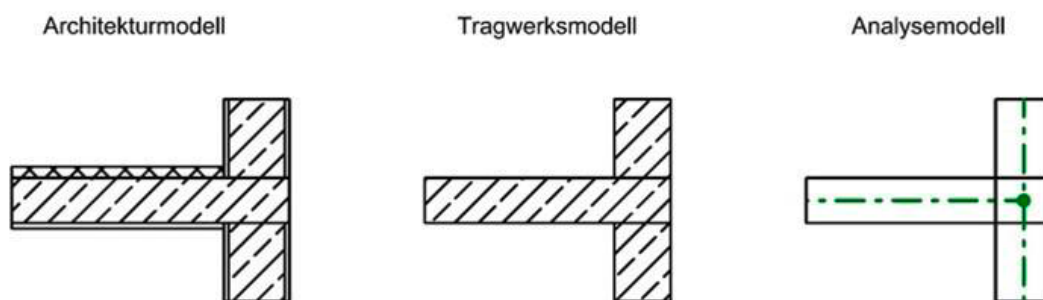


Abb. 1: Reduzierung des Architekturmodells zu einem Tragwerks- und Analysemodell

Statische Berechnung im BIM-Prozess

Grundsätzlich hat der Tragwerksplaner bezüglich seines allgemeinen internen Workflows in der statischen Tragwerksanalyse und der Wahl der Programme freie Hand. Er kann entscheiden, welche Berechnungs- und Bemessungsmethoden für die Genehmigungsstatik herangezogen werden. Die Planungsprozesse der Tragwerksanalyse lassen sich somit deutlich unabhängiger von der BIM-Arbeitsweise gestalten.

Aufgrund der fachspezifischen Modelle ist es den Ingenieuren überlassen, ob sie sich für eine reine 3D-Gesamtstatik, eine klassische 2D-Positionsstatik oder eine Kombination aus beidem entscheiden. Der Ablauf der statischen Berechnung bleibt daher im Wesentlichen gleich, nur das Werkzeug zur Informationsentnahme und

eine engere Abstimmung mit den Projektpartnern ändert die bisherige Arbeitsweise der Statiker.

Nachfolgend wird auf die wichtigsten zu berücksichtigenden Effekte einer BIM-orientierten Tragwerksberechnung eingegangen. Dabei geht es vorwiegend um automatisierte und teils automatisch erstellte dreidimensionale Analysemodelle, die bereits in einigen CAD-Programmen erstellt werden können und anschließend an die Statikprogramme übergeben werden:

- 3D-Gebäudemodelle in der Baustatik
- Konflikte bei der Modellierung und Detaillierung des Analysemodells
- Material- und Querschnittsmapping
- Lokale statische Einzel- und Detailnachweise

3. BIM-relevante Schnittstellen für die Tragwerksplanung

Das wohl wichtigste Werkzeug eines jeden BIM-Planers ist die Software. Aktuell gibt es eine große Anzahl an Programmen im Bauwesen, die versprechen, BIM-fähig zu sein. Für einen Statiker und Tragwerksplaner ist dies ein entscheidendes Kriterium, denn möchte er an einem BIM-Prozess teilnehmen, so muss auch seine Software über entsprechende Schnittstellen verfügen.

Auf der einen Seite gibt es die CAD- bzw. BIM-Applikationen, deren Schwerpunkt auf der architektonischen Seite liegt. Sie bilden mit ihren geometrischen und physikalischen Strukturmodellen ein realistisches 3D-Gebäude.

Auf der anderen Seite gibt es die Statikprogramme, die ein idealisiertes und vereinfachtes Berechnungsmodell als Basis für ihre statische Analyse haben. Hier werden statische Systeme durch Linien, Stäbe und Flächen in den Schwerachsen der 3D-Bauteile beschrieben. Dass hier zwei völlig unterschiedliche Geometrie- und Strukturphilosophien aufeinandertreffen, ist eine der größten Herausforderungen hinsichtlich der Interoperabilität von CAD- und Statiksoftware.

Interoperabilität

Interoperabilität beschreibt die Fähigkeit, Daten zwischen Anwendungen (BIM-Applikationen) möglichst verlustfrei austauschen zu können. Dabei versuchen die Softwarehersteller aller Art herstellerneutrale, offene, nicht proprietäre Datenformate für die Realisierung einer weitreichenden und sinnvollen Interoperabilität in ihre Programme zu implementieren. [1] [3]

Die heutige Welt der CAD- und Statiksoftware bietet drei Wege des Datentransfers an wie in *Abbildung 2* zu sehen ist. Angefangen mit der direkten nativen Schnittstelle, bei der proprietäre Formate benutzt werden, da sie vom gleichen Entwickler erzeugt werden über direkte Schnittstellen, wo zwei Programme Daten sowohl in die eine als auch in die andere Richtung

austauschen können bis hin zu indirekten Schnittstellen, die auf offene Austauschformate setzen.

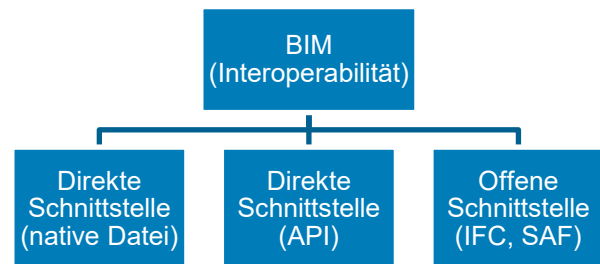


Abb. 2: Interoperabilität – Schnittstellen in BIM-Projekten [3]

Direkte Schnittstellen

Bei den direkten Schnittstellen handelt es sich primär um geschlossene Lösungen (Closed BIM). Hierbei erreichen die Architekten und Ingenieure konsistente, saubere und nahezu vollständige Modelle durch einen größtenteils fehlerfreien Datenaustausch zwischen den verknüpften CAD- und Statikprogrammen wie in *Abbildung 3*. [4]

Daher haben sich in der Praxis die direkten Schnittstellen bereits sehr gut etabliert und gelten aktuell als die derzeit effektivste und effizienteste Methode für einen BIM-basierten Datenaustausch zwischen Objektplanern und Tragwerksplanern. Allerdings weist dieser Ansatz auch eine große Einschränkung in der Softwareauswahl auf. So kann es vorkommen, dass nicht alle Fachplaner an einem BIM-Projekt teilnehmen können. [5]

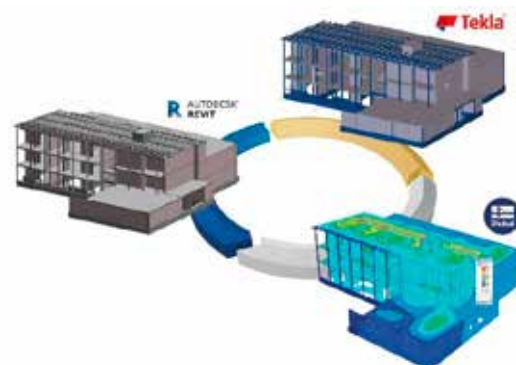


Abb. 3: BIM Workflow unter Softwareherstellern [5]

Offene indirekte Schnittstellen

Bei einem uneingeschränkten Austausch von BIM-Dateien werden den offenen Formaten eine wesentliche Schlüsselrolle zugeschrieben. Offene Standards sorgen nämlich für eine softwareübergreifende Datenübergabe.

Bei der Anwendung offener Schnittstellen und Lösungen können die Fachplaner mit ihren eigenen Softwareapplikationen arbeiten. Dabei kommen vorwiegend nichtproprietäre Formate wie IFC, BCF und SAF zum Einsatz, die unerlässlich für die Open BIM Arbeitsweise sind. [5]

Industry Foundation Classes – IFC

Das herstellerunabhängige Datenmodell IFC eignet sich besonders gut für Koordinations- und Abstimmungsaufgaben. Darunter fallen Anwendungsbereiche wie die Erstellung von Koordinationsmodellen, die Durchführung von Kollisionsprüfungen sowie Mengen- und Kostenermittlungen und visuelle Simulationen. [1] [2]

Allerdings hat es sich in der Tragwerksanalyse nicht durchgesetzt. Zu schwach gestaltet sich der Austausch von Statikmodellen basierend auf IFC-Daten, was häufig auf das Konvertieren eines Volumenmodells in ein Analysemodell zurückzuführen ist.

Structural Analysis Format – SAF

Das wohl jüngste Format Structural Analysis Format (SAF) ist ein Excel-basiertes Dateiformat für den Austausch von relevanten statischen Bauwerksdaten in der Tragwerksplanung. Es beinhaltet eine tabellenbasierte Datenbank von Geometrie-, Struktur- und Lastdaten in Excel, sodass das Lesen und Schreiben von Dateien durch CAD- und Statikprogramme erheblich vereinfacht wird.

Dadurch soll auch der Import und Export von Analyse- und Statikmodellen einfacher durchgeführt werden, weil die Daten hauptsächlich von den Statikprogrammen besser verarbeitet werden können. [6]

Im Mittelpunkt steht ein praktisches, einfach zu benutzendes und verständliches Format, das in der täglichen Praxis von Statikern verwendet werden kann. Basierend auf einer relationalen Datenbank können mehrere Objekttypen effektiv

miteinander verknüpft werden. Das führt zu einer verständlichen und übersichtlichen Darstellung der Struktur- und Lastdaten.

Da das Format noch relativ neu auf dem Markt ist, liegt die wohl größte Herausforderung in der Bekanntmachung und dem richtigen Marketing, es einer möglichst großen Anwenderschaft als innovatives und effektives Austauschformat für die Tragwerksanalyse zu präsentieren. Außerdem sind auch die Bausoftwareentwickler gefragt, die das neue Format in ihre Programme implementieren müssen. [6]

Bisher haben große CAD-Hersteller wie Tekla und Revit haben es (Stand August 2021) noch nicht in ihre Programme integriert, sind aber interessiert. Nur wenn die Akzeptanz sowohl auf der Anwender- als auch Softwareanbieterseite gegeben ist, kann es sich zu einem einheitlichen Austauschstandard für Statikmodelle entwickeln.

4. Fazit

Das Resultat dieser Arbeit gibt einen Einblick in das Potential eines neuen offenen Austauschformats für die Tragwerksplanung. Die gängige Baupraxis in der statischen Berechnung und die gezeigten Schnittstellen ergeben, dass ein von BIM gewünschter offener Datenaustausch mittels IFC-Schnittstelle ohne weiteres nicht einfach umzusetzen ist. Dagegen ist BIM-basierter Datenaustausch mithilfe direkter Schnittstellen am effektivsten und mit wenig Fehlern behaftet.

Um ein Open BIM-Szenario für Statiker attraktiver zu machen, ist man mit der Bereitstellung des SAF-Formats auf einem guten Weg, den Austausch von Statikmodellen in guter Qualität zu gewährleisten.

Somit steht einer BIM-gestützten Tragwerksplanung neben einigen kleinen Herausforderungen nichts mehr im Wege, um sich in Zukunft mithilfe offener Austauschformate auch bei allen Ingenieuren und Statikern zu etablieren.

Literaturverzeichnis

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] Borrmann, André et al. (2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.
- [2] Stange, Matthias (2020): Building Information Modeling im Planungs- und Bauprozess. Eine quantitative Analyse aus planungsökonomischer Perspektive, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.
- [3] Eastman, Charles et al. (2018): BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, Hoboken, New Jersey: Wiley
- [4] Albert, Andrej (2018): Schneider. Bautabellen für Ingenieure, 23. Aufl., Köln: Bundesanzeiger.
- [5] Rustler, Walter (2017): Building Information Modeling und Statiksoftware: Szenarien und Erfolgsfaktoren beim Datenaustausch, Baustatik – Baupraxis 13, Bochum
- [6] SAF Documentation by SCIA: <https://www.saf.guide/>

Autor

Daniel Dlubal, M.Sc., Bauingenieur

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der TU München angefertigt.

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
2. Betreuer: Simon Vilgertshofer, M.Sc.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

SELEKTIVE ZEMENTAKTIVIERUNG IM 3D-DRUCKVERFAHREN

UNTERSUCHUNG FORMOPTIMIERBARER BAUTEILE IM BESCHUSS- UND FREIFALLVERSUCH

Bachelorarbeit

Simon, Gradic

Die zunehmende Notwendigkeit von baulichem Schutz an öffentlichen Gebäuden (vgl. Abb. 1) verlangt eine Untersuchung von neuen Technologien und Methoden, um diese für die Baubranche effizient und realisierbar aufbereiten zu können [1]. In dieser Bachelorarbeit wird die Widerstandsfähigkeit von 3D-gedruckten Stahlfaserbetonplatten anhand von Beschuss- und Freifallversuchen untersucht.

Die Technologie des 3D-Drucks liefert hierbei große Potenziale einer effizienten und kostengünstigen Herstellung. Es werden insgesamt zehn unterschiedliche Stahlfaserbetonprobekörper im selektiven Zementaktivierungsverfahren gedruckt und getestet. Eine Untersuchung der Mängel nach dem Impact ermöglicht die Darstellung von Optimierungspotenzialen in der 3D-Druckherstellung von formoptimierbaren Bauteilen.

Keywords: 3D-Druckverfahren; selektive Zementaktivierung; Schutzbauteile; Beschussbelastung; Beschussversuch; Freifallversuch; formoptimierte Bauteile; Stahlfaserbeton; Faserverteilung



Abb. 1: 3D-gedruckte Stahlfaserbeton-Schutzbauteile am Beispiel eines Regierungsgebäudes (Quelle: eigene Visualisierung)

Das Potenzial im 3D-Druck

Um dem Anspruch moderner Architektur in einer labilen Sicherheitslage gerecht zu werden ist es erforderlich, auch Schutzbauteile breit gestreut und möglichst formfrei bauen zu können. (vgl. Abb. 2). Hierzu zählen zum Beispiel Sperrpoller, moderne Fassaden sowie Überdachungen von Kaufhäusern oder Parks. Innovative Technologien wie das 3D-Druckverfahren von Betonbauteilen bieten ein großes Potenzial für die Herstellung von frei formbaren Teilen [2].



Abb. 2: Formfreiheit und Architektur mithilfe 3D-Druckverfahren (Quelle: eigene Visualisierung)

Hinsichtlich statischer Herausforderungen des allgemeinen Bauwesens eröffnet die 3D-Druckherstellung von Stahlfaserbetonteilen neuen Handlungsspielraum. Die Formgestaltung eines Betonteils, inklusive seines inneren Gefüges ist flexibel definierbar und kann funktionsbasiert gestaltet werden.

Während die Einbringung der Bewehrung im bekannten Extruder-3D-Druckverfahren durch das Einschieben von Betonstahlstäben erfolgt, kann im selektiven 3D-Druckverfahren die Bewehrung durch eine direkte Stahlfaserzugabe im Compound sichergestellt werden. Betonteile mit Aussparungen, Verdrillungen und Überschneidungen könnten somit auch bewehrt gedruckt werden.

Durch eine durchdachte Ausrichtung der Stahlfasern kann zusätzlich bezogen auf die Lasteinwirkung eine erhöhte Zug- und Biegefestigkeit im Bauteil erreicht werden. Die Einbringung der Fasern erweist sich in der Praxis als nicht triviales Problem, da die Fasern

inhomogen im Bauteil verteilt sind und sich durch das Druckverfahren Cluster bilden. Die korrekte Lage der Stahlfasern und die Art der Bewehrungszugabe ist entscheidend für eine uneingeschränkte Nutzung des 3D-Druckverfahrens, welches zukünftig auch aufgrund von schwindenden Personalverfügbarkeiten im Fachkräftebereich des Bauwesens immer weiter in den Vordergrund rückt.

Inhalt und Aufbau der Arbeit

Die hier zusammengefasste Bachelorarbeit setzt sich allgemein aus einem theoretischen und einem experimentellen Teil zusammen. Im theoretischen Teil werden angelehnt an die Versuche die wichtigsten Vorgänge der Ballistik erklärt. Folgend wird das selektive 3D-Druck-Herstellungsverfahren und die Zusammensetzung der Proben dargestellt, welche hinsichtlich Betonzusammensetzung, Faserzugabe und Bewehrungsanteil variieren. Die Probekörper wurden mit freundlicher Unterstützung der Firmengruppe Max Bögl gefertigt.

Im experimentellen Teil werden der Beschuss- und der Freifallversuch, sowie deren Bedeutung vorgestellt. Es folgt eine übersichtliche Auswertung der Erkenntnisse. Ein Ausblick über weitere Innovationen im Bereich der Materialwahl und Konstruktion der Schutzteile ist am Schluss der Bachelorarbeit beschrieben.

Herstellung der Probekörper im selektiven Zementaktivierungsverfahren

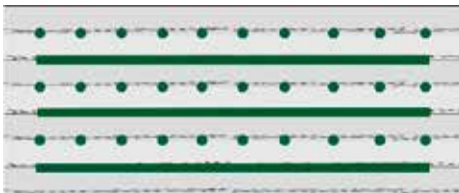
Das für die Probekörperherstellung zum Einsatz kommende selektive 3D-Druckverfahren ähnelt in seinen Grundzügen den bekannten Pulverbett-3D-Druckverfahren [3,4,5].

Ein Industrieroboter verteilt das Compound (Zement-Sand-Gemisch) bei der Materialaufgabe und im Materialauftrag auf einer Arbeitsfläche. Die bis zu 1 cm dicke Schicht wird durch einen Wasserstrahl aktiviert. Der Zement beginnt

auszuhärten und die Schritte werden wiederholt bis die gewünschte Bauteilhöhe erreicht ist.

Zusätzlich können auf jede Schicht Stahlfasern oder sonstige Bewehrungselemente wie Betonstahl eingelegt werden, um das Bauteil an notwendigen Stellen dichter zu bewehren. Für die folgend erwähnten Versuche wurden folgende Plattenvarianten angefertigt:

Probekörpervariante A



Probekörpervariante B



Probekörpervariante C



Abb. 3: schematische Querschnitte Probekörper

Bei der Probekörpervariante A wurden Stahlfasern in den Zwischenschichtbereich der gedruckten Schichten eingestreut, bevor eine neue Ebene an Material aufgetragen wurde. In Variante B wurden zusätzlich zur Variante A Betonstahlstäbe im 90° Winkel versetzt zueinander in die Zwischenschicht eingelegt. Bei Variante C wurde in der Zwischenschicht wie bei Variante A auf die Bewehrungslage verzichtet, die verwendeten Stahlfasern jedoch wurden direkt in das Trockencompound untergemischt und zusammen mit dem Material aufgetragen. Der gesamte Probekörper ist in diesem Fall mit Stahlfasern durchzogen.

Im Test: 3D-gedruckte Stahlfaserbetonplatten im Beschuss- und Freifall-versuch

Die Beschuss- und Freifallversuche werden durchgeführt, um das Verhalten des Projektils, der Anprallkörper und des Probenmaterials zu untersuchen und die Ergebnisse zusammenzufassen. Zu untersuchende Merkmale sind die Geschwindigkeiten, die Laufbahnen der einwirkenden Körper, die Abgabe von Energien an den Probekörper, das dynamische Verhalten der gedruckten Schichten, die Gesamtstabilität sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauteils.

Im Beschussversuch wird ein quadratischer Probekörper in einen Rahmen eingespannt und an vordefinierten Punkten mit Weich- und Hartkernmunition beschossen. Der Probekörper wird im Nachgang untersucht und mit allen Varianten verglichen.

Im Freifallversuch wird der Probekörper mit einem Fallkörper belastet (Abb. 4). Dieser wird aus einer Höhe von 10 m fallengelassen und trifft mit einer größeren Masse und einer kleineren Geschwindigkeit auf das Bauteil. Die Energie beim Aufschlag ist jedoch bei beiden Versuchen betragsmäßig gleich groß. Es unterscheiden sich im Wesentlichen die Schadensbilder, welche bei hochdynamischen Belastungen sehr genau betrachtet werden müssen, da sie in ihrer Auswirkung teilweise dem eines Fluids ähneln. Zerstörungsmuster sind an den Bauteilen nur sehr schwer vorhersehbar.



Abb. 4: Impaktierung der Probekörpervariante A durch den Fallkörper im Freifallversuch (links) und die Impaktierung durch ein Hartkerngeschoss im Beschussversuch (rechts)

Die Auswertungen der Proben erfolgten nach einem festen Schema:

1. Durchschussermittlung und Messungen der Einschusstiefe
2. Volumenbestimmung Kratermaterial
3. Aufnahme Rissbilder
4. Querschnittsauswertung
5. Computertomografische Auswertungen (Untersuchung des Bauteils durch Röntgenstrahlung bei Verdacht der Clusterbildung von Stahlfasern)

Ergebnisse

Abschließend lässt sich aus den Versuchen eine klare Tendenz ableiten. Das Compound der Probekörpervariante C ist im Voraus mit Stahlfasern vermischt worden. Die Probe C kann in den Versuchen die größte Widerstandsfähigkeit gegen Beschuss aufweisen. Zum anderen weist die Probe im Freifallversuch ein geringeres Abplatzungsvolumen auf, was für einen starken Zusammenhalt des Körpers spricht.

Automatisierung der Herstellung

Die Stahlfaserintegration könnte z.B. beim Extruder-Verfahren mit einem speziellen Industrieroboter (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) erfolgen. Die automatisierte Bewegung in alle Raumrichtungen ist mit einem solchen Gerät möglich. Die Stahlfasern können je nach Bedarf auf die gewünschte Länge zugeschnitten und in die Betonschichten mit dem notwendigen Winkel eingeschossen werden.

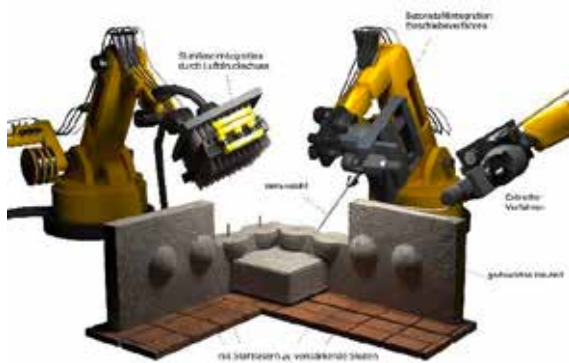


Abb. 5: Innovation der automatisierten Fasereinbringung im Extruder Verfahren (Quelle: eigene Visualisierung)

An komplexen Knoten und instabilen Randbereichen bewirken Faserverstärkungen stabilere und langlebigere Bauteile. Moderne architektonische Formen aus Beton können gedruckt werden und behalten ihre Form auch bei sicherheitskritischer Belastung.

Fazit

Die Art der Bewehrungsintegration mit Stahlfasern erweist sich für die Produktion geometrisch freier Bauteile als gut geeignet. Die Form der Stahlfasern müsste im selektiven 3D-Druckverfahren so optimiert werden, dass sich diese im Produktionsvorgang nicht querlegen (Abb. 6). Zudem wird durch die Verzögerung des Aushärtvorgangs der Schichten ein homogeneres und festeres Bauteil erstellt.

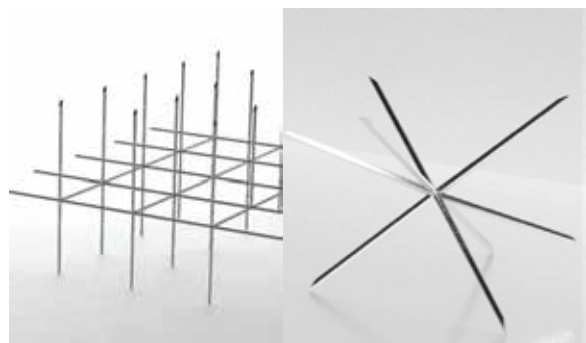


Abb. 6: Stahlfaserinnovationen: Fasermatten für Flächenbauteile (links) und Einzelfasern für formfreie Bauteile (rechts) (Quelle: eigene Visualisierung)

Zudem eröffnet die Automatisierung im 3D-Druck Bauunternehmen neue Wege hinsichtlich der digital gesteuerten Fertigung von Betonbauteilen ohne zusätzlichen Schalungsaufwand.

Aufgrund dessen ist es erforderlich, nicht nur die digitale Planung in der Baubranche auszuweiten, sondern auch im Bereich der Bauausführung automatisierte Prozesse zu etablieren. Bewehrungen könnten so gezielt, lastorientiert und materialsparend eingebaut werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Bundesministerium der Verteidigung (2016): *Weißbuch zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr*
- [2]: Bañón, C.; Raspall, F. (2021): *3D Printing Architecture: Workflows, Applications, and Trends*. 1. Aufl. Singapore: Springer
- [3]: Pegna, Joseph (1997): *Exploratory investigation of solid freeform construction*. Jg. 5, Nr. 5
- [4]: Vasilic, Ksenija (2020): *Additive Fertigung im Betonbau: aktueller Stand*. Jg. 115, Nr. 12
- [5]: Kruth, J. P. (1991): *Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques*. CIRP Annals, Jg. 40, Nr. 2

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Kneubühl, Beat P. (2018): *Ballistik*. Berlin, Heidelberg: Springer
2. Zukas, Nicholas et al. (1992): *Impact Dynamics*. Malabar, Fla.: Krieger Publ
3. Zohrabyan, Vahan; Seltner, Tobias; Braml, Thomas; Keuser, Manfred (2022): *Dynamic Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete Plates Under Gun Fire and Free Fall Tests*. in RILEM Bookseries, Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II, P. Serna, A. Llano-Torre, J. R. Martí-Vargas und J. Navarro-Gregori, Hg., Cham: Springer International Publishing

Autor

Leutnant Simon Gradic
Studiengang Bauingenieurwesen & Umweltwissenschaften
Universität der Bundeswehr München

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Institut für konstruktiven Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München.

Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert
Betreuer: Dipl.-Ing. (Univ.) M.Eng. Vahan Zohrabyan
Mit freundlicher Unterstützung durch die Firma Max Bögl: M.Sc. Raphael Zöller

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

ANALYSE EXTREMALER OFFENSIVKONZEPTE FÜR DEN ÖPNV IM LÄNDLICHEN RAUM

Masterarbeit

Michael Knüpfer

Vor dem Hintergrund des sich zuspitzenden Klimawandels besteht im Verkehrssektor mit seinem hohen Anteil der CO₂-Emissionen deutlicher Handlungsbedarf zur Einhaltung der internationalen Klimaschutzziele. Gerade in ländlichen Räumen, in denen die Pkw-Nutzung nach wie vor stark dominiert, wird durch die Nutzung des pro Kopf deutlich energieeffizienteren öffentlichen Verkehrs großes Einsparungspotenzial erwartet. Die vorliegende Arbeit prüft, wie auch dort eine Angebotsqualität im ÖPNV geschaffen werden kann, die als ernst zu nehmende Alternative zum privaten Pkw wahrgenommen wird und entsprechende, zur Einhaltung der Klimaziele erforderliche Verhaltensänderungen auslösen kann. Dazu wird von dem derzeit üblichen Bottom-up-Modell der ÖPNV-Angebotskonzeption abgewichen und stattdessen ein Top-down-Ansatz gewählt. Ausgehend von zunächst auf theoretischer Ebene gewonnenen Erkenntnissen aus netzmorphologischen Überlegungen wird eine Angebotsstrategie aufbauend auf einer hierarchischen Netzstruktur konzipiert und anhand einer beispielhaften Anwendung im Landkreis Ansbach analysiert. Das verfolgte Konzept basiert auf einem System integral getakteter Expressbuslinien als Verbindung zu und zwischen lokalen Zentren sowie einem flexiblen Zubringersystem, das die Fläche an das übergeordnete Netz anschließt. Anhand ausgewählter Kenngrößen konnten erhebliche Verbesserungen in der ÖPNV-Angebotsqualität im ländlichen Raum und deren hohe Wirksamkeit zur Verringerung der Treibhausgase nachgewiesen werden. So konnte gezeigt werden, dass bereits ab einer Reduzierung der Verkehrsleistung im Pkw-Verkehr um 2,6 Prozent mit einer wirksamen Reduzierung von Treibhausgasen gerechnet werden kann.

Keywords: Mobilität, ÖPNV, Angebotsattraktivität, Verkehrswende, ländlicher Raum

Motivation und Zielsetzung

Es ist hinlänglich bekannt, dass die Menge an klimawirksamen Treibhausemissionen angesichts des sich zuspitzenden Klimawandels drastisch reduziert werden muss. Dabei spielt der Verkehrssektor eine große Rolle. Im Jahr 2018

waren ca. 27 Prozent aller Treibhausemissionen der EU auf den Verkehrssektor und davon von 44 Prozent allein auf die Nutzung privater Pkw zurückzuführen [1]. Daran wird deutlich, dass hier Handlungsbedarf besteht. Ein „Abschaffen“ oder starkes Einschränken des Verkehrs ist kaum

möglich, da Mobilität ein Grundbaustein unserer Gesellschaft und heute wichtiger denn je ist. Auch eine vollständige Umstellung auf E-Mobilität kann unter Berücksichtigung der Emissionen durch Faktoren wie Stromerzeugung oder Rohstoffförderung, Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge (Graue Energie) den erforderlichen Einspareffekt im nötigen Zeitrahmen nicht allein erreichen. Dafür ist eine Verlagerung auf den pro Kopf deutlich effizienteren öffentlichen Verkehr und damit eine Verringerung der Anzahl einzelner Pkw-Fahrten essenziell wichtig. Es ist somit eine „echte Verkehrswende“ nötig.

Der öffentliche Verkehr ist im Gegensatz zum individuellen motorisierten Verkehr in den letzten Jahrzehnten jedoch immer weiter ins Hintertreffen geraten bzw. gerade in Deutschland stark vernachlässigt worden. Dies trifft aufgrund der dispersen Siedlungsstruktur, geringen Bevölkerungsdichte und damit dem geringen und großflächig verteilten Fahrgastaufkommen besonders auf ländliche Regionen zu. Mobilität bedeutet die Teilnahme am gesellschaftlichen Leben und diese ist für Menschen, die nicht Auto fahren können, dürfen oder wollen ohne ein attraktives öffentliches Verkehrsangebot nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, wie eine flächendeckende, offensive ÖPNV-Angebotsstrategie im ländlichen Raum konkret aussehen kann, welche Rahmenbedingungen dafür erfüllt werden müssen und welche Potenziale und Verschiebungen im Reisezeitverhältnis zwischen Pkw-Verkehr und ÖPNV bei der Implementierung eines solchen Systems zu erwarten sind. Die deutliche Qualitätssteigerung im Angebot soll zu einer stärkeren Nachfrage im öffentlichen Verkehr führen und das Potenzial nach sich ziehen den ÖPNV zu einem ernst zu nehmenden Konkurrenzsystem zum motorisierten Individualverkehr (MIV) anzuheben. Durch die so erreichte Verringerung der Fahrleistung im MIV können der Energieverbrauch und damit die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors gesenkt und somit ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz sowie zur

Schonung natürlicher Ressourcen geleistet werden.

Zur Überprüfung dieser Hypothese werden zunächst unterschiedliche ÖPNV-Netzkonzepte erarbeitet, am Beispiel eines Teilgebietes konkret angewendet und bewertet. Im Gegensatz zu den derzeit gebräuchlichen Ansätzen im ÖPNV soll hier nicht vom Bestand ausgehend (Bottom-up), sondern die Angebotsstrategie aus Richtung eines erstrebenswerten Maximal-Angebots her betrachtet werden (Top-down). Diese Vorgehensweise soll genutzt werden, um neue, bisher wenig betrachtete Möglichkeitsräume in der ÖPNV-Angebotskonzeption losgelöst von der politischen Bereitschaft zur Finanzierung auszuleuchten und zu analysieren. Als grobe Zielvorgabe wird eine nach Kipke [2,3] abgeschätzte, auf die Gebietsfläche bezogene jährliche Betriebsleistung von ca. 20.000 Fahrzeugkilometern pro km² bzw. Fzg-km pro km² pro Werktag angesetzt.

Konzeption

Zur Entwicklung einer konkreten, beispielhaften ÖPNV-Angebotskonzeption werden Varianten zunächst auf einer stark abstrahierten Ebene untersucht. Entwicklungsziel ist die Konzeption eines übersichtlichen und damit für Fahrgäste gut verständlichen Systems mit geringen Zugangshindernissen und gleichzeitig noch annehmbaren Reisezeitverhältnissen zwischen Individualverkehr (IV) und öffentlichem Verkehr (ÖV). In Kombination mit einer hohen räumlichen wie zeitlichen Verfügbarkeit durch ein durchgängiges Fahrtenangebot rund um die Uhr sowie kurzen Fahrzeugfolgezeiten soll flächendeckend eine gute Verbindungs- und Erschließungsqualität gewährleistet werden.

In Anlehnung an Van Nes [4] wird bewusst ein in Teilen intramodaler Angebotsansatz auf Basis mehrerer hierarchisch gegliederter Netzstufen und -formen verfolgt. Während die oberste Netzform eine größere Maschenweite, hohe Geschwindigkeiten und eine limitierte Zugänglichkeit (Haltestellendichte) aufweist, zeigt die niedrigste eine hohe Dichte und geringe

Fahrgeschwindigkeit, dafür jedoch eine gute räumliche Erschließungsqualität. [5]

Es wird ein System von Expressbuslinien als Verbindung zu und zwischen lokalen Zentren sowie einem Zubringersystem, das die Fläche an das übergeordnete Netz anschließt, verwendet. Die Grundlage des Hauptnetzes bilden in regelmäßigen Abständen angeordnete Knotenpunkte, an denen sich immer mindestens zwei Linien der obersten Netzhierarchie (Hauptlinien) zeitkonform kreuzen bzw. beginnen oder enden. Infolge der damit erreichten ähnlichen Fahrzeiten zwischen diesen Knoten wird die Umsetzung eines integralen Taktfahrplans mit kurzen Umsteigevorgängen zwischen den Linien erleichtert. Zudem werden durch die direkte Linienführung, die begrenzte Anzahl an Haltepunkten und Nutzung übergeordneter Straßen auch vergleichsweise hohe Beförderungsgeschwindigkeiten möglich. Durch die Verbindung mit einem dichten Takt und einem durchgehenden Fahrtenangebot rund um die Uhr ergibt sich eine gute zeitliche wie örtliche Verfügbarkeit und Verbindungsqualität auf Relationen zu lokalen Zentren. In den angesprochenen Knoten entstehen somit auch im ländlichen Raum s.g. „Mobility-Hubs“ deren Lagegunst im öffentlichen Verkehrsnetz auch Auslöser für weitere soziale und wirtschaftliche Funktionen sein kann. Die komplexe, funktionsgerechte Ausgestaltung dieser stellt eine interessante zukünftige Aufgabe für die Bauindustrie dar.

Die Flächen zwischen den Hauptlinien werden durch Zubringerlinien (2. Netzhierarchie), entweder als klassischer Linienverkehr oder durch Nutzung nachfragegesteuerter Bediensysteme an das Hauptnetz angeschlossen. Es werden sowohl für das Haupt- wie auch Nebennetz verschiedene Netzstrukturen bzw. Betriebsformen betrachtet sowie Möglichkeiten neuer Mobilitätsformen aufgezeigt. Auf Basis der zuvor erwähnten abstrahierten Untersuchungsschritte mit unterschiedlichen Netzmorphologien wie tri-, ortho- oder hexagonalen, aber auch radial-ringsymmetrischen Netzformen (bspw.

Abb. 1) konnten bestimmte Kombinationen auf ihre grundsätzliche Eignung für die Umsetzung von integralen Taktfahrplanmodellen überprüft werden.

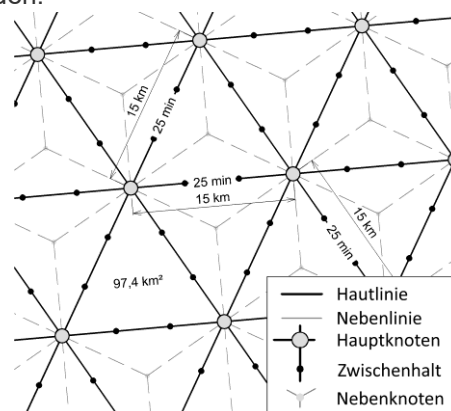


Abb. 1: Darstellung eines idealisierten, trigonalen Rasters

Beispielhafte Anwendung

Aufbauend auf diesen Vorüberlegungen erfolgte die beispielhafte Anwendung auf den Landkreis Ansbach im Regierungsbezirk Mittelfranken, Bayern. Nach Analyse der vorhandenen Raumstruktur, Angebotssituation und Verkehrsnachfrage wurden als Hauptnetz ein Orthogonalraster sowie ein Radial-Ring-Netz mit je zwei unterschiedlichen Knotenabständen entsprechend der Zielsetzung und vorausgegangenen theoretischen Konzeption auf das Gebiet angewendet. Die Auslegung der als Flächenerschließung dienenden Nebenlinien in den Zwischenräumen erfolgt individuell angepasst an die lokale siedlungs- und infrastrukturelle Situation. Zur Quantifizierung der verkehrlichen und ökologischen Wirkungen der unterschiedlichen Angebotsvarianten wurden alle Netzstufen, d. h. das gesamte Haupt- und Nebennetz für das Anwendungsgebiet in der Verkehrsmodellierungssoftware PTV Visum implementiert.

Darstellung der Ergebnisse

Mithilfe des Verkehrsmodells wurden Kennwerte wie die flächenbezogene Fahrleistung, Flächenerschließung, Erreichbarkeit zentraler Orte, Umsteigehäufigkeit und das Reisezeitverhältnis zwischen ÖV und IV für jede Variante ermittelt und untereinander sowie mit dem

heutigen Angebot verglichen. In diesem konkreten Anwendungsfall stellt sich ein Radial-Ring-Netz mit einem kleineren Knotenabstand um die Stadt Ansbach selbst als beste Variante heraus. Die Eignung einer Netzform ist jedoch stark von der jeweils vorhandenen Verkehrs- und Siedlungsstruktur des Gebietes abhängig, weshalb dieses Ergebnis zunächst nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden kann. Bei Gegenüberstellung mit dem derzeitigen ÖV-Angebot im Landkreis wird ersichtlich, dass sich die bezogene flächenbezogene Betriebsleistung beinahe verfünffacht und sich insbesondere die Erreichbarkeit von Grund- und Oberzentren sowie das Reisezeitverhältnis zum IV deutlich verbessert.

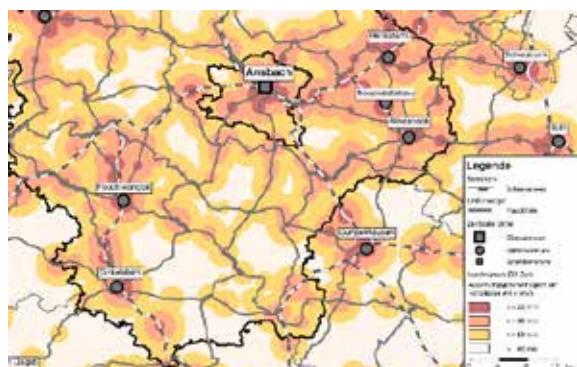


Abb. 2: Ausschnitt einer ÖV-Isochronendarstellung zur zeitlichen Erreichbarkeit von Mittel- und Oberzentren

Aus einer überschlägigen Gegenüberstellung des energetischen Aufwands zwischen neuem und bestehendem Fahrtenangebot zeigt sich, dass durch die deutliche Angebots- und damit Attraktivitätssteigerung ein zusätzlicher Endenergiebedarf von ca. 80 GWh pro Jahr generiert wird. Wenn infolge der deutlich höheren Attraktivität des öffentlichen Verkehrs jedoch die Zahl individueller Pkw-Fahrten reduziert wird, führt dieser energetische Mehrbedarf des ÖPNV ggf. zu einer Minderung der Gesamtenergiebilanz. So zeigte sich, dass zur Kompensation des Mehrenergiebedarfs im Untersuchungsgebiet bereits eine Reduzierung der Pkw-Fahrleistung von nur 3,1 % genügt. Im Hinblick auf die CO₂-Emissionen liegt dieser Wert bei 2,6 %. Die höheren Emissionen einer solchen Ausweitung des öffentlichen Verkehrsangebots können also bereits durch einen

geringen Prozentsatz der Pkw-Fahrleistung aufgewogen werden. Wenn darüber hinaus mehr Fahrten umgelagert werden können, ergibt sich ein entsprechend größeres Einsparungspotenzial. Noch größer ist die energetische und ökologische Wirkung, wenn infolge des deutlich besseren ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum zunehmend auf eine Pkw-Neuanschaffung verzichtet wird. Auch in ökonomischer Hinsicht wirkt ein offensives ÖPNV-Konzept im ländlichen Raum chancenreich. Wenn die geschätzten jährlichen Kosten von ca. 63.000 Euro/km² für das gesamte Beispielgebiet auf die dort gemeldeten Sozialversicherungspflichtigen umgelegt würden, entstehen Kosten von ca. 1.500 Euro pro Person und Jahr. Im Vergleich dazu ergeben sich, bei Ansatz der üblichen Pkw-Vollkosten von 30 Cent/km, für eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von ca. 14.700 km [6] knapp 4.400 Euro für einen Fahrzeughalter.

Fazit

Die Untersuchung liefert einen ersten Ansatz, wie ein attraktives und im Alltag auch wirklich nutzbares Angebot im ländlichen Raum aussehen und funktionieren kann. Der Vorschlag betrachtet einige Aspekte jedoch vereinfachend und findet nicht für alle Randbedingungen optimale Lösungen. Da Art und Betriebsform einer geeigneten Netz- und Angebotsstruktur stark von lokalen Rahmenbedingungen abhängig sind, bedarf es dort auch der Anwendung mathematischer Optimierungsverfahren, die z. B. weitere Fahrzeitverkürzungen zur Folge haben können. Insgesamt zeigte sich jedoch, dass es möglich ist, bereits durch eine relativ kleine Verlagerung zugunsten des ÖV-Angebots und damit verbundene verringerte Nutzung des Pkw entsprechende Einsparungen in den Emissionen des Verkehrssektors zu erreichen. Wie viel Pkw-Verkehr durch ein, wie hier vorgeschlagenes Angebotskonzept tatsächlich „ersetzt“ werden kann, hängt allerdings stark von der Akzeptanz in der Bevölkerung ab, sodass auch diesbezüglich noch Bedarf und Potenzial für weitere vertiefte Überlegungen und Ausarbeitungen besteht.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: European Environment Agency (EEA): Greenhouse gas emissions from transport in Europe 2018
- [2]: Kipke, Harald: Mobilität im Klimawandel - Eine neue Aufgabe für den öffentlichen Verkehr im ländlichen Raum? Teil 1: Straßennetz als Basis für eine ÖPNV-Netzstruktur, in: Verkehr + Technik 01/2022, S. 25 ff. (zur Zeit der Anfertigung der Arbeit noch unveröffentlicht)
- [3]: Kipke, Harald: Mobilität im Klimawandel - Eine neue Aufgabe für den öffentlichen Verkehr im ländlichen Raum? Teil 2: Offensive ÖPNV-Angebotsstrategien im ländlichen Raum in: Verkehr + Technik 02/2022, S. 57 ff. (zur Zeit der Anfertigung der Arbeit noch unveröffentlicht)
- [4]: van Nes, Robertus (2002): Design of multimodal transport networks. A hierarchical approach. Zugl.: Delft, Techn. Univ., Diss., 2002. Delft: Eigenverl.
- [5]: Oswald, Rettich, Roost, et al. (2021): Endbericht Bauen für die neue Mobilität im ländlichen Raum. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Kassel.
- [6]: infas, im Auftrag des BMVI: Mobilität in Deutschland 2017 – Ergebnisbericht; S.70

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Oswald, Rettich, Roost, et al. (2021): Endbericht Bauen für die neue Mobilität im ländlichen Raum. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Kassel.
2. Kipke, Harald.: Mobilität im Klimawandel - Eine neue Aufgabe für den öffentlichen Verkehr im ländlichen Raum? Teil 1 & 2 in: Verkehr + Technik 01/2022, S. 25 ff. bzw. 02/2022, S. 57 ff. (zur Zeit der Anfertigung der Arbeit noch unveröffentlicht)
4. Kirchoff, Peter; Tsakarestos, Antonios (2007): Planung des ÖPNV in ländlichen Räumen. Ziele - Entwurf - Realisierung. 1. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
5. Kutter, Eckhard (2002): Innovative räumliche Planung. Kernpunkt regionaler Verkehrsgestaltung. Hg. v. Technische Universität Hamburg-Harburg (ECTL Working Paper, 14).

Autor

Michael Knüpfer, B. Eng.

2020 – 2022 Masterstudium „Urbane Mobilität“ an der Technischen Hochschule Nürnberg, Abschluss M.Eng.

2016 – 2020 Bachelorstudium Bauingenieurwesen mit Vertiefung Verkehrswegebau an der Technischen Hochschule Nürnberg, Abschluss B.Eng.

2015 – 2016 Fachgebundene Hochschulreife an der Berufsoberschule Nürnberg

2012 – 2015 Berufsausbildung Bauzeichner für Tief-, Straßen- und Landschaftsbau

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Verkehrswesen an der Technischen Hochschule Nürnberg angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch Dr.-Ing. Harald Kipke, auf den ebenfalls die grundlegende Idee hinter dieser Arbeit zurückzuführen ist. Großer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Tilman Gänsler, der die Arbeit insbesondere in modelltechnischer Hinsicht unterstützt hat.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

MIKRORISSBILDUNG IM ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON (UHFB)

Bachelorarbeit

Elisabeth, Schmid

Äußere sowie innere Einflüsse führen dazu, dass die Tragfähigkeit sowie die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken über die Lebensdauer abnehmen. Seit einigen Jahren gibt es deshalb Versuche bestehende Betonbauwerke mit einer dünnen Schicht aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) zu schützen beziehungsweise zu verstärken. Im Fokus dieser Arbeit steht die Mikrorissbildung von UHFB, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit hat. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Mikrorissbildung an Probekörpern mit und ohne Faserbewehrung, an Probekörpern mit und ohne Vorlast sowie an Probekörpern aus Normalbeton, auf welche zusätzlich eine dünne Schicht aus Ultra High Performance Concrete (UHPC) aufgebracht wurde, untersucht.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich Mikrorisse auf etwa der halben Schichtdicke der Spritzbetonschicht anhäufen. Erkenntnisse aus der Literatur lassen darauf schließen, dass dies möglicherweise auf ein autogenes Schwinden zurückgeführt werden kann. Die Zugabe einer Faserbewehrung konnte die gemessenen Rissparameter jedoch deutlich senken. Auch bei den Verbundprobekörpern konnte die Faserzugabe die Rissflächensumme auf das Niveau zurückbringen, welches die Probe ohne Verformungsbehinderung hat. Auch wenn sich bei einzelnen, einer Druckbelastung ausgesetzten Proben geringere Mikrorissparameter als bei unbelasteten Proben zeigten, ist grundsätzlich festzustellen, dass eine Erhöhung der Druckbelastung mit einem tendenziellen Anstieg der Rissparameter einhergeht.

Keywords: Mikrorisse, UHFB, Faserbewehrung, Druckbelastung, Verbundkörper

Untersuchungen zu gespritztem UHPC

Im Bereich des Ingenieurbaus gibt es einen erheblichen Instandsetzungsbedarf. Dieser wird beispielsweise durch chloridinduzierte Korrosion

verursacht. Seit einiger Zeit gibt es deshalb besondere Untersuchungen um die Stand-sicherheit und die Gebrauchstauglichkeit von Verkehrsbauwerken sicherzustellen, dafür kann beispielsweise auf, einer Chloridbelastung ausgesetzten Bauwerke eine dünne Schicht aus

UHFB per Spritzverfahren aufgebracht werden. Es ist bekannt, dass normaler UHPC aufgrund seiner Zusammensetzung und der häufig zur Festigkeitssteigerung eingesetzten externen Wärmebehandlung einer erhöhten Gefahr der Rissbildung ausgesetzt ist. Mikrorissuntersuchungen, wie es sie zum Beispiel zu Hochfesten Betonen gibt, sind zu gespritztem UHPC jedoch nicht zu finden. Die Literaturrecherche zeigte, dass aktuell mit gespritztem UHPC nur Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, der mechanischen Eigenschaften und Dauerhaftigkeitsversuche durchgeführt wurden [1–3].

Experimentelle Untersuchungen

Am Beginn der experimentellen Untersuchungen wurden Probekörper aus gespritztem UHPC mit und ohne Faserbewehrung erstellt. Zusätzlich wurde auf zuvor erstellte Normalbetonschichten eine Schicht aus UHPC aufgebracht. Hier wurde ebenfalls eine Spritzbox mit und eine ohne Faserbewehrung erstellt.

Die erstellten Spritzboxen wurden anschließend in Würfel geschnitten. Sowohl Würfel mit Faserbewehrung als auch ohne sind anschließend mit verschiedenen Laststufen in Kurzzeit- und Langzeitversuchen einaxial druckbelastet worden. Während der Druckbelastung wurde die Ultraschalllaufzeit gemessen, als indirekte Mikrorissuntersuchungsmethode, um auf eine innere Schädigung während der Belastung schließen zu können.

Die Probekörper, ohne und mit Vorbelastung sowie mit Verformungsbehinderung (Normalbetonschicht), wurden anschließend für die direkte Mikrorissuntersuchung präpariert. Dabei wurde mittels Vakuums grün eingefärbtes Epoxidharz in die Risse und Poren eingesogen. Dadurch waren die Mikrorisse unter einem Digitalmikroskop erkennbar. Bei der nachfolgenden Mikrorisszählung wurde die

Anzahl, die Länge, die Breite und die sich daraus ergebende Fläche der Mikrorisse ermittelt.

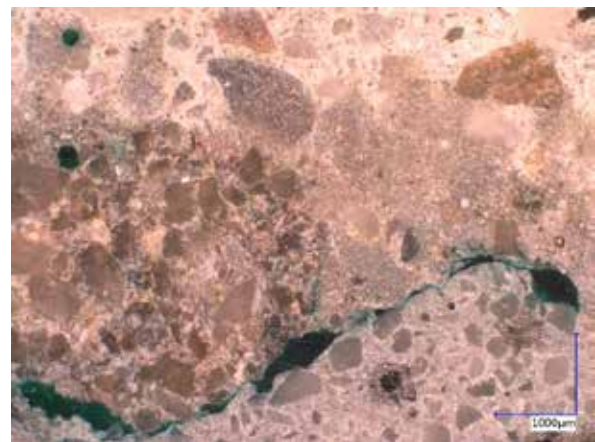


Abbildung 1: Beispielhafter Ausschnitt der Verbundzone zwischen UHFB und Normalbeton

Bei den Proben ohne Faserbewehrung ist eine Mikrorisshäufung auf etwa der halben Stärke der Spritzbetonschicht erkennbar, wie in der Abbildung 2 deutlich wird. Dort ist beispielhaft die Verteilung der Mikrorisse einer Probe über den Probenquerschnitt dargestellt. Die Anhäufung könnte die Folge des inneren Selbstaustrocknens und des dadurch entstehenden autogenen Schwindens sein.

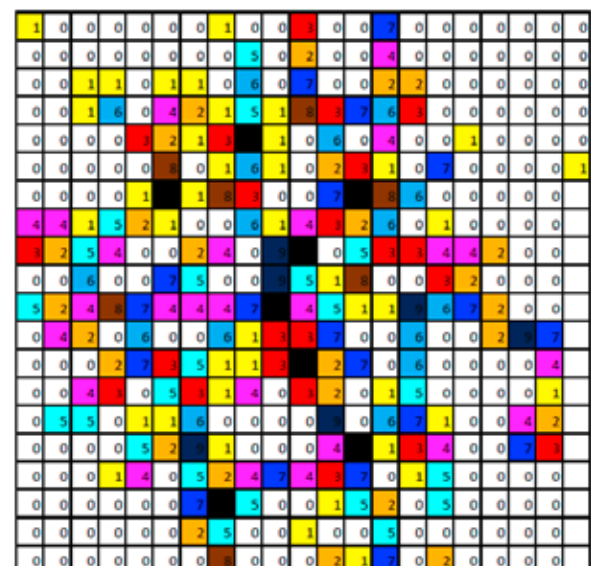


Abbildung 2: Verteilung der Mikrorisse über den Probenquerschnitt einer Probe ohne Faserbewehrung geschnitten senkrecht zur Spritzrichtung

Bei der Betrachtung des Parameters Faserbewehrung und deren Ausrichtung konnte

eine Auswirkung vor allem bei den Proben, welche senkrecht zur Spritzrichtung geschnitten wurden, erkannt werden. In dieser Richtung waren alle untersuchten Mikrorissparameter deutlich niedriger. Begründet werden kann dies durch die Lage der Fasern in einer Ebene parallel zum Spritzuntergrund und der Wirkungsweise der Fasern in Zugrichtung. Dies führt dazu, dass vor allem Risse senkrecht zur Faserbewehrung schmaler bleiben.

Wenn die Spritzbetonschicht durch eine darunterliegende Altbetonschicht in ihrer Verformung behindert ist, kommt es zu einer verstärkten Mikrorissbildung, welche sich in einer erhöhten Rissflächensumme äußert. Die Steigerung betrug ca. 70% im Vergleich zur Probe ohne Verformungsbehinderung. Sobald der Spritzbetonschicht jedoch Fasern hinzugegeben werden, ist die Rissflächensumme nahezu identisch, wie ohne Verformungsbehinderung.

Die Verbundzone war jedoch sowohl mit als auch ohne Faserbewehrung stärker geschädigt als die Normalbetonschicht beziehungsweise die UHPC Schicht wie in Abbildung 1 erkennbar ist.

Messung der Ultraschalllaufzeit

Beim Parameter Vorbelastung wurden wie oben erwähnt die Ultraschalllaufzeiten gemessen, es konnte im Verlauf jedoch kein Zusammenhang erkannt werden zwischen Druckbelastung und den Laufzeiten. Erklärbar wäre dies wahrscheinlich durch eine, dem Aufbau geschuldete, ungleichmäßige Ankopplung der Prüfköpfe an den Probekörper. Bei der direkten Mikrorissuntersuchung der mit Druck vorbelasteten Proben konnte die Tendenz festgestellt werden, dass mit zunehmender Belastung die Rissparameter steigen. Die langzeitbelasteten Proben hatten jeweils mit Abstand die höchste Rissflächensumme, wie beispielsweise in Abbildung 3 erkennbar ist.

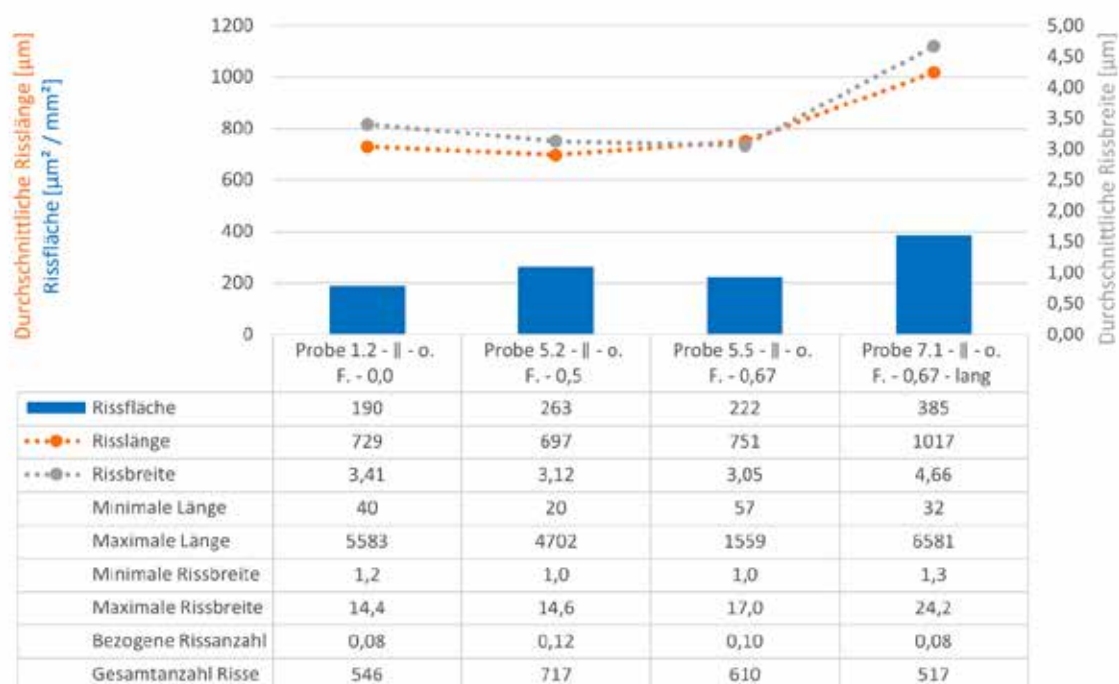


Abbildung 3: Mikrorissparameter der Probekörper ohne Faserbewehrung und unterschiedlicher Druckbelastung

Ausblick

Durch die direkte Mikrorissuntersuchung konnte gezeigt werden, dass das Hinzufügen einer Faserbewehrung die Rissparameter deutlich reduzieren kann. Bei den Proben mit Verformungsbehinderung konnte die hinzugefügte Faserbewehrung die entstandenen Risse, welche aufgrund der Spannungen durch die behinderte Verformung entstehen, fast vollständig eliminieren.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen mit Druckbelastung konnte durch die direkte Mikrorissuntersuchung zwar ein tendenzieller Anstieg der Rissparameter mit steigender Belastung erkannt werden, bei der Bestimmung der inneren Schädigung mittels Messung der Ultraschalllaufzeit konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen Belastung, direkter Mikrorissuntersuchung und den gemessenen Ultraschalllaufzeiten gewonnen werden. Hier stellt sich die Frage, ob der Versuchsaufbau und die daraus folgende ungleichmäßige Ankopplung die Ursache ist, oder ob auch in weiteren Untersuchungen kein Zusammenhang erkennbar ist.

Ebenfalls sollte der Einfluss der Faserbewehrung auf die Dauerhaftigkeit separat betrachtet werden, denn in [4] zeigen die Versuchsergebnisse, dass die Anwesenheit zwar zu einer Erhöhung der Duktilität führt aber auch sowohl eine Steigerung als auch eine Reduktion des Korrosionswiderstands bewirken kann, unabhängig von deren Beitrag zur Vermeidung von Mikrorissen.

Welchen Einfluss eine Druckbelastung auf die Dichtigkeit und folglich auf die Dauerhaftigkeit hat sollte durch direkte Dauerhaftigkeitsuntersuchung während einer Druckbelastung noch zusätzlich dargestellt werden. Dies ist entscheidend für das Anwendungsfeld, die Sanierung von bestehenden Bauwerken, denn dabei ist vor allem die Dauerhaftigkeit entscheidend für den Erfolg.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

Literatur

- [1] *Alain Huynh*: Innovative rehabilitation technology for corrugated metal pipe culverts using wet-mix sprayed UHPFRC. UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards (2017), S. 717–724.
- [2] *Laurence Trucy*: Ultra High Performance Shotcrete: Yes we can! Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (2017), S. 153–162.
- [3] *Marc Jolin*: Shotcrete. Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of RILEM Technical Committee 181-EAS - Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, S. 315–322.
- [4] *Jennifer Scheydt*: Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton. Dissertation. Karlsruhe 2013.

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- Laurence Trucy*: Ultra High Performance Shotcrete: Yes we can! Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (2017), S. 153–162.
- Marc Jolin*: Shotcrete. Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of RILEM Technical Committee 181-EAS - Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, S. 315–322.
- Andrea Kustermann*: Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge. Dissertation. München 2005.

Autor

Elisabeth Schmid, Bachelor of Engineering

Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Hochschule München. Betreut wurden die Untersuchungen durch Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann und M. Eng. Toni Pollner.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSATZ VON RECYCLINGBETONMEHL ALS FÜLLER IM BETON ZUR VERBESSERUNG DER PACKUNGSDICHTE, VERARBEITBARKEIT UND FESTIGKEIT

Bachelorarbeit

Lisa Schmidt

Die Zementherstellung ist mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden. Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Arbeit, den Zementgehalt im Beton durch die Zugabe von fein aufgemahlenem (< 63 µm) Recyclingbetonmehl (RC-Mehl) zu reduzieren. In der Laboranalytik sind die Rohdichte und die spezifische Oberfläche des RC-Mehls ermittelt worden. In der praktischen Versuchsreihe wurde der Einfluss des Anteils an RC-Mehl auf die Packungsdichte und weiter auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit untersucht. Zudem wurde auf die Wirkung einer thermischen Behandlung des RC-Mehls auf die Packungsdichte eingegangen.

Keywords: Recyclingbeton, Recyclingbetonmehl, RC-Mehl, feine rezyklierte Gesteinskörnung, Betonzusatzstoff, Füller, Zementreduktion, CO₂ Reduktion

Einleitung

Der Baustoff Beton hat gegenüber anderen Baustoffen viele Vorteile, angefangen mit der Gestaltungsfreiheit sowie seiner Dauerhaftigkeit, Standhaftigkeit und Sicherheit. Neben den genannten Vorteilen hat Beton den Nachteil, dass seine Herstellung mit einer hohen Umweltbelastung verbunden ist. Den größten Anteil an der Umweltbelastung hat die Zementherstellung. Mit einem Anteil von 8% an den globalen Treibhausgasemissionen zählt die Zementherstellung zu den emissionsreichsten Industrieprozessen. [1] Durch das globale Bevölkerungswachstum, der zunehmenden

Urbanisierung gekoppelt mit Infrastrukturentwicklungen, steigt der Bedarf an Zement weltweit an. Es wird bis 2050 mit einem Zuwachs von 12 – 23 % gerechnet. [2] Berücksichtigt man diese Entwicklung, entsteht ein Handlungsbedarf zur Reduzierung der Umwelteinflüsse aus der Zementherstellung. Ein möglicher Ansatz ist die Herstellung von zementarmen Betonen. Der durch die Zementreduktion entstehende Festigkeitsverlust kann durch die Optimierung der Packungsdichte der Feststoffe und der Verringerung des w/z- Werts kompensiert werden. [3] Die Erhöhung der Packungsdichte kann durch die Zugabe von Betonzusatzstoffen erreicht werden. Hier setzt die Arbeit an und

verwendet RC-Mehl. Dieses hat gegenüber anderen Gesteinsmehlen den Vorteil, dass es mit einer Rückführung von mineralischen Abfällen in den Stoffkreislauf verbunden ist.

Fragestellung und Vorgehensweise

Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Ziel, den Zementgehalt im Beton durch die Zugabe von fein auf gemahlenen RC-Mehl, bei gleichbleibenden Betoneigenschaften, zu reduzieren. Der Schwerpunkt liegt auf dem Erhalt der Verarbeitbarkeit und der Festigkeit.

Im ersten Schritt der hier vorliegenden Arbeit wurden die spezifische Oberfläche und Rohdichte des RC-Mehls bestimmt. Anschließend wurde der Einfluss der Mahlfeinheit und des Anteils an RC-Mehl auf die Packungsdichte und weiter auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit untersucht. Dazu wurden Mörtelprismen und Betonwürfel mit unterschiedlichen Zusammensetzungen auf die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften geprüft. Zudem wurde auf die Wirkung einer thermischen Behandlung des RC-Mehls auf die Packungsdichte eingegangen.

Laborversuche

Das in dieser Arbeit verwendete RC-Mehl stammt aus dem Abbruch der im Norden München liegenden Bayernkaserne. Die dort abgebrochenen Gebäudekomplexe wurden zwischen 1936 und 1970 erbaut. Es handelt sich um reinen Betonabbruch < 2 mm. Der Betonbruch wurde mittels Kugelmühle fein auf gemahlen. Für die Versuche sind zwei Mahlvarianten verwendet worden. Im Folgenden wird in Abhängigkeit ihrer spezifischen Oberfläche zwischen feiner ($S_1 = 11.910,2$ cm²/g) und groben Mahlung ($S_2 = 4.234,2$ cm²/g) unterschieden. Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche wurde das Blaine Verfahren nach DIN EN 196-6 [4] eingesetzt. Die Rohdichte des

RC-Mehls ist mit Hilfe des Pyknometers nach DIN EN 1097-7 [5] zu $2,7$ g/cm³ ermittelt worden. Anschließend wurde der Wasseranspruch und die Packungsdichte bestimmt. Dazu wurde der Wasseranspruch zum Erreichen der Normsteife mittels Vicat Versuch und die Packungsdichte über die „wet packing“-Methode in Anlehnung an [6] bestimmt.

Es sind zwei Versuchsreihen durchgeführt worden. Die erste Versuchsreihe untersucht den Einfluss der Mahlfeinheit, des Anteils an unbehandeltem RC-Mehl und der Packungsdichte auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit von Mörtel und Beton. Der Zement ist im Verhältnis 1:1 und 1:2 ersetzt worden. Das RC-Mehl wird zu den inerten Zusatzstoffen gezählt und als Füller verwendet (< 63 µm). In der zweiten Versuchsreihe wird thermisch behandeltes RC-Mehl eingesetzt. Es wird der Einfluss der thermischen Aktivierung auf die Packungsdichte des Mörtels untersucht. Dazu ist das RC-Mehl bei 600°C , 650°C und 700°C gebrannt worden.

Ergebnisse

Bei der Verwendung des unbehandelten RC-Mehl konnte beim Einsatz der groben Mahlvariante eine Steigerung der Packungsdichte im Vergleich zur feinen Mahlung beobachtet werden. Es kann keine signifikante Verbesserung der Packungsdichte bei der Verwendung der groben Mahlvariante zwischen dem Austausch im Verhältnis 1:1 und 1:2 festgestellt werden. Durch den Einsatz thermisch behandelten RC-Mehls konnten höhere Packungsdichten erzielt werden. Unabhängig von der Brenntemperatur wurde eine Steigerung gegenüber dem unbehandelten RC-Mehl erreicht. Beim Ersatz von 10 M.% Zement durch 20 M.% RC-Mehl konnte keine Abhängigkeit der Packungsdichten von der Brenntemperatur gezeigt werden. Beim Ersatz von 20 M.% Zement durch 40 M.% RC-Mehl nimmt die Packungsdichte bei Brenntemperatur für 600°C

und 700 °C zu. Bei Brenntemperaturen von 700 °C ergibt sich ein vergleichbarer Wert für beide Austauschgrade. Der Maximalwert der Packungsdichte wird bei einer Brenntemperatur von 600 °C für den Ersatz von 10 M.% Zement durch 20 M.% RC-Mehl erreicht. Der geringste Wert für die Proben mit thermisch behandelten RC-Mehl wird bei einer Brenntemperatur von 650 °C und dem Ersatz von 20 M.% Zement durch 40 M.% RC-Mehl erzielt (siehe Abb. 1).

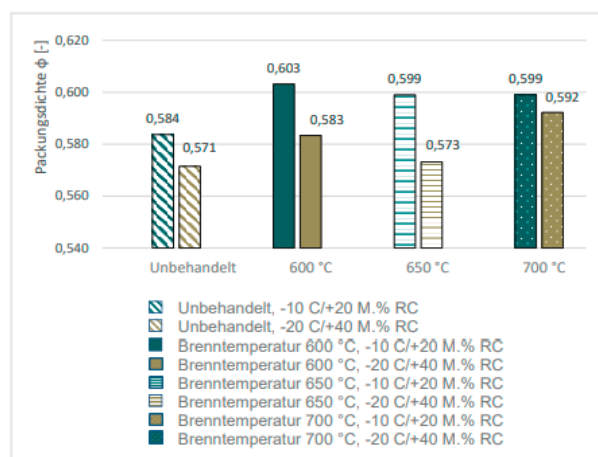


Abbildung 1: Einfluss der Brenntemperatur auf die Packungsdichte

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit wurde das Ausbreitmaß bestimmt. Es ist zu erkennen, dass das Ausbreitmaß für beide Zusammensetzungen beim Einsatz der groben Mahlvariante abnimmt. Der höchste Wert für das Ausbreitmaß kann bei der feinen Mahlvariante beim Ersatz von 10 M.% Zement durch 20 M.% RC-Mehl erreicht werden. Beim Ausbreitmaß kann beim Austauschgrad 1:1 im Vergleich zu 1:2 höhere Wert erreicht werden. Den größten Wert für das Ausbreitmaß erzielt man beim Austauschgrad 1:1 beim Ersatz von 20 M.% Zement durch 20 M.% RC-Mehl.

Vergleicht man die Druckfestigkeitswerte der Mörtelproben der beiden Mahlvarianten, wird deutlich, dass mit der groben Mahlvariante höhere Festigkeiten erzielt werden können.

Das steht im Einklang mit den Ergebnissen der Packungsdichtenbestimmung. Hier konnte gezeigt werden, dass aufgrund der hohen

Feinheit des RC-Mehls ein Rückgang der Packungsdichte eintritt. Mit der Erhöhung des Austauschgrades von 1:1 zu 1:2 ist keine deutliche Verbesserung der Festigkeit verbunden (siehe Abb.2).

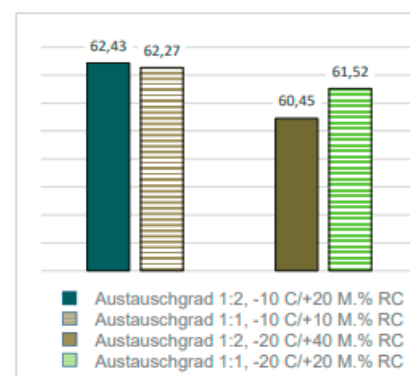
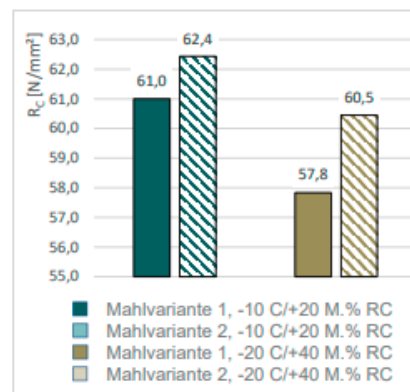


Abbildung 2: Einfluss der Mahlvariante und des Austauschgrades auf die Druckfestigkeit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit der groben Mahlvariante höhere Packungsdichten und Festigkeiten erzielt werden können. Die thermische Behandlung führt zu einer Steigerung der Packungsdichte im Vergleich zu den Proben mit unbehandeltem RC-Mehl. Beim Einsatz des RC-Mehls als Füller, bei gleichzeitiger Verringerung des Zementanteils kann eine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit bei allen Proben unabhängig von der Mahlvariante, dem Austauschgrad und -verhältnis festgestellt werden. Der Festigkeitsverlust durch die Zementreduktion konnte bei beiden Mahlfineheiten, Austauschgraden und -zusammensetzungen kompensiert werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Dr. Erika Bellmann: Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie – Hintergrund und Handlungsoptionen. In: WWF (2019).
- [2]: IEA - International Energy Agency: Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry (2018).
- [3]: Proske, T.; Hainer, S.; Jakob, M. et al.: Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton. In: Beton- und Stahlbetonbau (2012), Heft 6, S. 401-413.
- [4]: DIN EN 196-6: Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit. DIN, Ausgabe März 2019.
- [5]: DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnung - Teil 7: Bestimmen der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren. Ausgabe Juni 2008.
- [4]: Wong, H.H.C.; Kwan, A.K.H.: Packing density of cementitious materials: part 1 - measurement using a wet packing method. In: Materials and Structures 41 (2008), Heft 4, S. 689-701.

Autor

Lisa Schmidt

Seit 03/2021

Masterstudium Bauingenieurwesen Hochschule Regensburg

10/2017 – 03/2021

Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der Hochschule München

Betreuer

Die Arbeit wurde im Labor für Baustoffe der Hochschule München angefertigt.

Prof. Dr. Ing. Andrea Kustermann

M. Ing. Benjamin Wolf

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.

OBJEKT- UND VERSIONSBASIERTE SCHLITZ- UND DURCHBRUCHSPLANUNG IN OPEN BIM-PROJEKTEN MITTELS EINES DATENBANKGESTÜTZTEN WORKFLOWS

Masterarbeit

Ganga Surendran Sanila

Die Schlitz- und Durchbruchplanung (SuD-Planung) ist einer der ineffizientesten und zeitaufwendigsten Koordinationsprozesse des Bauwesens. Die, in der Gegenwart immer noch häufig praktizierte, planbasierte Koordination erscheint dem Planer zwar als einfach, führt aber zu einem Medienbruch zwischen CAD-Modell und Plan. Die Durchgängigkeit der Informationen geht dadurch verloren und der Prozess erleidet Einbußen in Dynamik und Flexibilität. Durch moderne modellbasierte Methoden mit Durchbruchvorschlägen kann der Prozess digitalisiert werden. Dieser modellbasierte Ansatz lässt sich jedoch nur dann verfolgen, wenn alle Projektbeteiligten ein hohes technologisches Verständnis aufweisen bzw. auf Software-Plugins zurückgreifen, die jedoch nicht immer den realen Planungsprozess abbilden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein objektbasierter und datenbankgestützter Koordinationsprozess mit einem Single Source of Truth Ansatz entwickelt, der die Kernaspekte des Prozesses vollumfänglich berücksichtigt, eine Versionierung/Historie einführt und somit eine Synchronisation der Freigaben/Änderungen erlaubt. Der Cloud-basierte Ansatz unterstützt die Planer, ohne diese mit technischen Details zu behelligen und erlaubt des Weiteren ein effizientes, rechtebasiertes und automatisiertes Änderungsmanagement.

Keywords: Schlitz- und Durchbruchplanung (SuD-Planung), BIM, PfV-Objekt, Single Source of Truth

Digitalisierung des Baugewerbes

Die Durchbruchvorschläge werden vom TGA-Planer erstellt und müssen von dem Architekten (ARC) bzw. den anderen Fachplanern (z.B. Tragwerksplaner (TWP)) genehmigt werden. Dabei wird die Durchbruchplanung auf Übereinstimmung mit den eigenen Entwurfskriterien und technischen Rahmenbedingungen überprüft

und die Prüfergebnisse in den Koordinationsprozess als „Freigabe“/ „Bitte um Wiedervorlage“ zurück gespeist. Durch die starke gegenseitige Abhängigkeit der involvierten Fachdisziplinen ist dieser Prozess nicht trivial. Freigabekommentare bzw. Änderungsanweisungen einer Disziplin können starke Auswirkungen auf die weiteren

Planungsbeteiligten haben. Die Koordination erfolgt in der Regel dokumentenbasiert (PDF). Dies kann zu diversen Austauschzyklen führen [1,2,3].

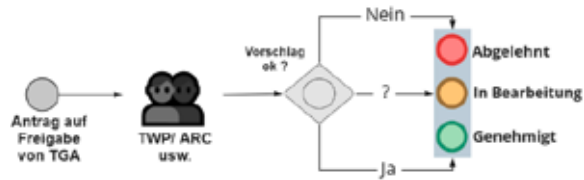


Abb. 1: Freigabeprozess bei der Durchbruchsprüfung

Selbst nach der endgültigen Freigabe und Integration der Koordinationsergebnisse in die Modelle der Disziplinen kommt es in der Regel zu späten Änderungen von Positionen und Abmessungen der Schlitz- und Durchbrüche, die üblicherweise ebenfalls über Pläne koordiniert werden. Obwohl es in der Praxis diverse digitale Methoden und modellbasierte Ansätze gibt, erscheint die SuD-Planung immer noch als ein ungelöster Koordinationsprozess, der bei jedem neuen Projekt scheinbar auch neu erfunden werden muss. Eine rechtzeitige Koordinierung und die Konsistenz zwischen den Disziplinen sind jedoch entscheidend, um diesen Prozess effizient zu gestalten und kostspielige Fehler zu vermeiden [1,2]. Im Rahmen der Digitalisierung des Bauwesens haben wir die große Chance bestehende Prozesse zu hinterfragen und weiter zu entwickeln. Mit dieser Abschlussarbeit soll der Prozess der SuD-Planung neu konzipiert werden.

Problemstellung

Schlitz- und Durchbrüche sind in der konventionellen 2D-CAD Planung einfache Symbole, häufig ohne Bezug zum zugehörigen Bauteil [3]. Die Koordination über PDF-Dateien ist naturgemäß ein manuelles Unterfangen, das menschliche Eingaben, Interpretation und Übertragungen erfordert. Diese Freigabe-Dokumente sind nicht mit der CAD-Datei verbunden, weshalb die Informationen in der Regel nur in eine Richtung fließen und einer menschlichen Interaktion bedürfen, um wieder in die Konstruktionsumgebung zurückzugelangen [4]. Die SuD-Planung ohne den Einsatz der BIM-

Methode weist in vielen Bereichen Schwächen auf, die immer wieder zu Fehlern, Problemen oder gar Streitigkeiten zwischen den Beteiligten führen kann. Die Grundlage einer BIM-basierten SuD-Planung ist die Erstellung eines autarken Durchbruchmodells mit Vorschlägen („Provision for Void“, kurz: PfV). Die PfV-Objekte können entweder nativ oder als IFC-Datei (IFC = openBIM Austauschformat) durch den TGA-Planer zur Verfügung gestellt werden. Die Vorschlagsmodelle bilden die Basis für die Abstimmung der Schlitz- und Durchbrüche [2].



Abb. 2: BIM-basierten SuD-Planung [5]

Für die modellbasierte Koordination ist das BIM Collaboration Format (BCF) das am häufigsten verwendete Verfahren [1,2]. Bei der BCF-Methode werden Aufgaben, sogenannte Issues, an Objekte im Modell angeheftet. Diese Issues sind jedoch nicht für die Durchbruchfreigabe konzipiert und haben den großen Nachteil, nicht eindeutig den Objekten zugeordnet werden zu können. Es besteht daher die Möglichkeit, mehrere Freigabe-Issues für jeden Durchbruchvorschlag zu erstellen [6], was zu einem Verlust der Übersichtlichkeit führen kann. Andere modellbasierte native oder IFC-basierte Ansätze erfordern das mehrfache Versenden und Vergleichen des kompletten PfV-Modells (dateibasierter Austausch), um ggf. Änderungen einiger wenige PfV-Objekte neu zu kommunizieren. Die Änderungen müssen für das gesamte Modell nachvollzogen werden, da sich selbst freigegebene Durchbrüche verändern können.

Zielsetzungen

Nach einer kritischen Prüfung der derzeitigen Methoden und Prozesse wurden die folgenden Ziele festgelegt.

openBIM: Da an diesem Koordinationsprozess mehrere Disziplinen beteiligt sind und diese nicht zwingend in der gleichen geschlossenen Softwareumgebung arbeiten, ist ein open BIM-Ansatz (VDI/bS 2552, Teil 11.2 [2]) notwendig.

Single source of truth (SSOT): Alle Informationen zu den ‚PfV-Objekten‘ (Geometrie, Position, Freigabestatus) müssen in einer einzigen Quelle versioniert gespeichert werden.

Objektbasierte Kommunikation: Der Austausch von Modelldateien ist nicht sinnvoll, da sich zumeist nur einzelne ‚PfV-Objekte‘ verändern. Der Austausch muss daher in Form einer Synchronisation erfolgen (Abgleich zwischen Sender und Empfänger).

Änderungsverfolgung: Um einen Überblick über jeden ‚PfV-Objekt‘ Vorschlag hinsichtlich seiner früheren Position, Geometrie und Freigabeinformationen zu erhalten, ist eine Änderungsverfolgung der Aussparungsvorschläge notwendig.

Informationsaustausch in Echtzeit: Um den Freigabeprozess effizienter und transparenter zu gestalten, ist eine Echtzeitkommunikation zwischen den Planern mit aktuellen Informationen unerlässlich.

Konzept

Der Informationsfluss beginnt mit einem Eintrag in einer kollaborativen Cloud-Datenbank, die eine Basis der Entscheidungen darstellt und die objektbasierte Echtzeitkoordination von Durchbrüchen mit den aktuellen Freigabe- und Geometrieinformationen ermöglicht. Darüber hinaus werden alle Prüfungen und Freigaben der PfV-Objekte, das Änderungsmanagement und die Kommunikation modellbasiert im bevorzugten Entwurfswerkzeug des Endanwenders durchgeführt. Die Verbindung zwischen diesen Werkzeugen und der Cloud-Datenbank wird über Web-Application-Programming-Interfaces (kurz: Web-APIs) hergestellt. Alle Informationen zu den Durchbruchs-Objekten werden in einer zeitbasierten Versionierung gespeichert.

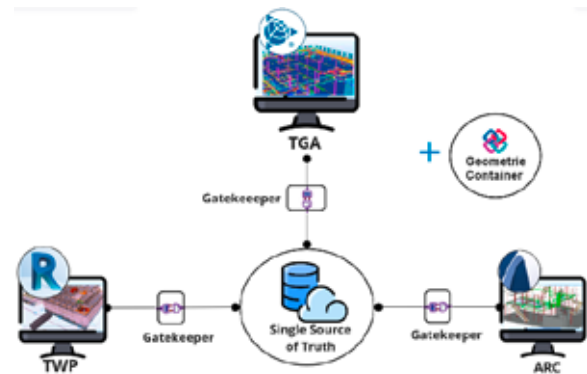


Abb. 3: Konzeptdarstellung - kollaborative Cloud-Datenbank

Entwicklung des Prototyps

Zur Validierung des Konzepts wurde ein Prototyp entwickelt, der sich aus einer zentralen Datenbank und einem Gatekeeper Tool als Sender/Empfänger zusammensetzt. Für die Datenbank wurde auf eine NoSQL (Not only Structured Query Language) Graph-Datenbank (Neo4j AuraDB [7]) zurückgegriffen, die als Single Source of Truth fungiert. Das Gatekeeper Tool wurde für Autodesk Revit konzipiert, da diese BIM-Autorensoftware am Markt stark verbreitet ist und eine offene API aufweist. An dieser Stelle sei festgehalten, dass sich das Konzept auf ähnliche Programme mit offener API z. B. Graphisoft Archicad analog übertragen lässt. Das Gatekeeper-Tool zwischen Revit und der Cloud-Datenbank wurde im .NET Framework mit der Programmiersprache C# implementiert und als Plugin in Revit integriert.

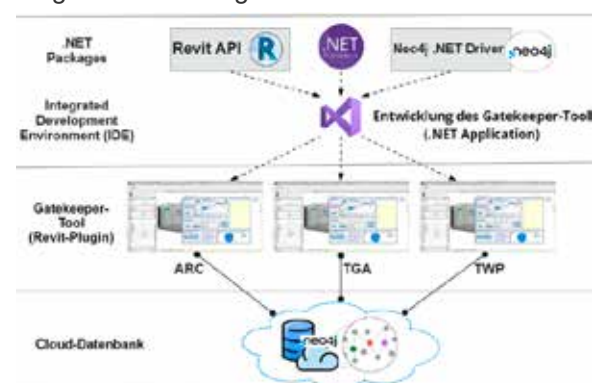


Abb. 4: Software Ökosystem Übersicht des Prototyps

Die zeitliche Versionierung von Informationen über PfV-Objekte wurde durch die Modellierung eines 'Labelled Property Graphs' mit der Cypher Query Language umgesetzt [7,8,9]. Das von den

Experten in den Interviews beschriebene Konzept der SuD-Planung wurde zunächst in einem Whiteboard gesammelt und dann als Grundlage für das Graphmodell verwendet.



Abb. 5: Implementierter Labelled Property Graph

Ergebnisse

Der Prototyp wurde mit einem aktuellen openBIM-Großprojekt des Büros Bollinger+Grohmann evaluiert. Außerdem wurde ein End-to-End-Test in Zusammenarbeit mit einem erfahrenen TGA-Planer durchgeführt. Der entwickelte Prototyp stellt den Planern folgende Funktionalitäten zur Verfügung:

- Vorschlag neuer/aktualisierter PfV-Objekte
- Bereitstellen einer Freigabeauswahl mit Datum und Kommentar
- Abruf des aktuellen Freigabestatus eines PfV-Objekts
- Änderungshistorie
- Überprüfung des Koordinationsfortschritts in einem Dashboard

Die Geometrie und die Informationen zwischen Durchbruchvorschlag und den tatsächlich

automatisch generierten Durchbrüchen werden mit der Cloud-Datenbank in einer zeitbasierten versionierten Weise verknüpft, um den Planern dabei zu helfen, die Änderungen der Durchbrüche in hochkomplexen Projekten zu verfolgen. Es ist möglich, die Historie der Durchbrüche visuell (als temporäre Körper im Entwurfswerkzeug) oder als Änderungsprotokoll nachzuverfolgen. Diese Funktionalität unterstützt den Planer bei einem besseren Änderungsmanagement und hilft ihm dabei, den Überblick über die eigene Planung zu behalten.

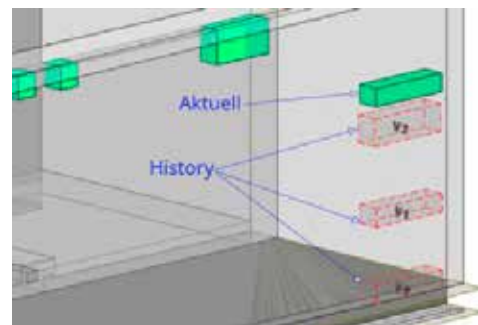


Abb. 6: Visualisierung der Planungshistorie in Revit

Fazit und Ausblick

Die Schlussfolgerung ist, dass das Konzept die Abläufe der SuD-Planung beschleunigt und den Planern dabei helfen kann, die Konsistenz durch einen automatisierten Ansatz aufrechtzuerhalten. Darüber hinaus lassen sich durch mögliche zukünftige Entwicklungen automatisierte Synchronisations- und Kontrollroutinen einbinden, die auch das Change-Management während der Ausführungsplanung deutlich verbessern können.



Abb. 7: Anwenderschnittstelle des entwickelten Gatekeeper-Tools für die SuD-Planung

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1]: Hofbeck, A., Gutena, T., Matschinsky, F. (2021). Modellbasierte Schlitz- und Durchbruchsplanung in der openBIM Methode.
- [2]: BuildingSMART-Regionalgruppe Mitteldeutschland (2020). Leitfaden für die Schlitz- und Durchbruchsplanung auf Basis von IFC. https://www.teamproject.de/wp-content/uploads/2021/02/190812_Leitfaden_SD-Planung_auf_Basis_von_IFC.pdf
- [3]: Trimble. (2017). Recesses in the BIM workflow. <https://www.stabiplan.com/en-us/news/news-and-blogs/recesses-in-the-bim-workflow/>
- [4]: Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). Bim handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers, 3rd Edition.
- [5]: Leitfaden für die BIM Modellierung in Revit. BIM Blog. Retrieved February 1, 2022, from <https://blogs.autodesk.com/bimblog/leitfaden-fur-die-modellierung-in-revit/>
- [6]: Esser, S.: Kommunikation in BIM-Projekten auf Grundlage von BCF-Daten. München: Technische Universität München, Eigenverlag, 2018, Download auf www.cms.bgu.tum.de/de über www.bit.ly/tga1362
- [7]: Robinson, I., Webber, J., & Eifrem, E. (2015). Graph databases: New opportunities for connected data, Second edition, O'Reilly Media
- [8]: Lazarevic, L. (2019, December 16). Keeping track of graph changes using temporal versioning. Neo4j Developer Blog. <https://medium.com/neo4j/keeping-track-of-graph-changes-using-temporal-versioning-3b0f854536fa>.
- [9]: Isaac, S., & Navon, R. (2013). A graph-based model for the identification of the impact of design changes. Automation in Construction, 31, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.043>
- [10]: Korman, T. M., Fischer, M. A., and Tatum, C.B. (2003). "Knowledge and reasoning for MEP coordination." Journal of Construction Engineering and Management, 129 (6), 627-34.

Autor

Ganga Surendran Sanila, M.Sc. TUM

Seit 2022	Tragwerksplanerin; B+G Ingenieure Bollinger und Grohmann GmbH, München
2020 - 2022	Werkstudentin; B+G Ingenieure Bollinger und Grohmann GmbH, München
2019 - 2020	Wissenschaftlicher Hilfskraft; Lehrstuhl für Statik, TU München
2019	Softwarepraktikum; Lehrstuhl für Statik, TU München & BMW Group, München
2018 - 2022	Masterstudentin des Bauingenieurwesens; TU München
2017 - 2018	Tragwerksplanerin; Anarc Builders & Developers, Kerala, Indien
2013 - 2017	Bachelorstudentin des Bauingenieurwesens; University of Kerala, Indien

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation (Prof. Dr.-Ing. André Borrmann) an der Technischen Universität München erstellt. Die Betreuung erfolgte durch Fritz Beck. Die Masterarbeit ist in Kooperation mit dem Büro Bollinger+Grohmann entstanden. Besonderer Dank gilt dabei den Betreuern Alexander Hofbeck und Florian Gschwind.

Die Arbeit wurde mit dem 1. Preis ausgezeichnet.

Für weitere Informationen scannen Sie bitte den QR Code



NACHTRÄGE INFOLGE BAUZEITÄNDERUNGEN UND BAU- ABLAUFSTÖRUNGEN

Masterarbeit

Maria Wagner

Die erfolgreiche Abwicklung eines Bauvorhabens bedingt für den Auftragnehmer im Wesentlichen eine Ausführung unter Einhaltung des zeitlichen Bauablaufs, der kalkulierten Kosten und der ausgeschriebenen Qualität. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass sämtliche Rahmenbedingungen und äußere Einflüsse bestmöglich eingehalten werden, um die Wirtschaftlichkeit gewährleisten zu können. Denn die vorgegebenen Vertragstermine bilden für den Auftragnehmer (AN) die Grundlage der Kalkulation. Der anhaltende Wettbewerb erfordert eine fortlaufende Optimierung von Geräte-, Maschinen- und Personaleinsatzzeiten, um den Projekterfolg sicherzustellen. Es verwundert kaum, dass in der Praxis mit steigender Tendenz bei kleinsten Änderungen der Leistung oder der Bauzeit mit Behinderungsanzeigen und Ankündigungen von Vergütungsforderungen reagiert wird. Fraglich ist nur, ob die Rechtsgrundlagen aus BGB und VOB/B sowie die individuellen vertraglichen Vereinbarungen des Bauvertrages bei Auftraggeber und Auftragnehmer dabei immer ausreichend bekannt sind und ob die Forderungen dem gerecht werden. Ziel dieser Arbeit war die Erstellung eines Leitfadens zum Umgang mit Nachträgen infolge Bauzeitänderungen und Bauablaufstörungen unter Zugrundelegung aktueller Rechtsprechung und baurechtlicher Literatur. Die komplexe und aufwändige Dokumentation für den sog. Kausalitätsnachweis sollte anhand eines einfachen Bauprojektes aufgezeigt werden.

Keywords: Bauvertrag, modifizierte Vergütung, Bauzeitverzögerung, Behinderung, Schadensersatz, Entschädigung, Kausalitätsnachweis

Nachtragskultur bei Bauprojekten

Regelmäßig kommt es bei kleinen wie auch großen Bauprojekten zu Nachtragsforderungen aufgrund unterschiedlicher Ursachen. Zu den Einflussgruppen zählen neben baubegleitender Planung, Anordnungen des Auftraggebers (AG) zu Leistungsmodifikationen und der Bauzeit oder die Verletzung von Mitwirkungspflichten. Grund

sätzliche Voraussetzung für einen Nachtrag bildet eine Bausoll-Bauist-Abweichung. Zum Bausoll gehört die bauinhaltlich geschuldete Leistung sowie die Art und Weise der Leistungserbringung. Während man eine bauinhaltliche Änderung gegenüber der Vertragsleistung in der Praxis meist als Nachtrag bezeichnet, spricht man bei einer Änderung der Baumstände von

Behinderung bzw. Störung [1]. Nicht jede Bausoll-Bauist-Abweichung bedingt automatisch einen Anspruch auf modifizierte Vergütung oder Auswirkungen auf die Bauzeit, sodass weitere Voraussetzungen erfüllt werden müssen. Zudem muss die jeweils richtige Anspruchsgrundlage der VOB/B definiert werden. Der zunehmende Trend der gegenseitigen Forderungen von AG und AN während der Vertragszeit misst der Kenntnis der Grundlagen stetig mehr Bedeutung zu.

Anordnungen mit Änderungen der Bauzeit

Angeordnete Leistungsänderungen gemäß § 1 Abs. 3 VOB/B i.V.m. § 2 Abs. 5 VOB/B können sich auf Verfahrenstechniken, die Bauausführung und Einsatzzeiten auswirken und haben folglich Einfluss auf die Bauzeit. Mögliche Folgen sind Bauzeitverzögerungen, Verlängerungen von Ausführungsdauern oder Änderungen des Gesamtablaufs. Daraus resultierend kann der AN sowohl die leistungsbezogenen als auch die zeitabhängigen Mehrkosten im Sinne der vorkalkulatorischen Preisfortschreibung verlangen. Eine Mehrkostenanmeldung von angeordneten, modifizierten Leistungen ist in der Praxis zu empfehlen. Ist erkennbar, dass im Zusammenhang mit der Leistungsmodifikation eine Veränderung der Bauzeit steht und ggf. Ausführungsdauern verändert werden müssen, hat der AN unverzüglich und schriftlich eine Behinderungsanzeige gemäß § 6 Abs. 1 VOB/B zum Zwecke der Dokumentation beim AG einzureichen. Der Nachweis erfolgt dem Grunde und der Höhe nach [1, 2]. Zudem bedarf es beim Nachweis von Bauzeitänderungen infolge modifizierter Leistungen einer konkreten, bauablaufbezogenen Darstellung.

Bauablaufstörungen

Neben Leistungsänderungen aus § 2 Abs. 3, 5 und 6 VOB/B gibt es weitere Fälle, die Einfluss auf die Bauzeit haben [3]:

- 1) Umstände aus dem Risikobereich des AG
- 2) Annahmeverzug des AG

- 3) unterlassene, verspätete oder mangelhafte Mitwirkung des AG
- 4) Einwirkungen Dritter aus dem Risikobereich des AG

Jede Störung mit negativen Folgen in zeitlicher und/oder finanzieller Hinsicht für den Bauablauf und die Produktivität ist eine Behinderung. Diese kann den vorgesehenen Bauablauf hemmen, verzögern oder zu einer Unterbrechung in Form eines Arbeitsstillstandes führen. Laut baubetrieblichen Untersuchungen liegt die größte Verlustquelle für Bauunternehmen in Störungen des Bauablaufs, die zu erheblichen Mehrkosten führen [4]. Finanzielle Auswirkungen können Kosten für längere Einsatzzeiten von Personal und Geräten, längere Vorhaltung von BE, Material- und Lohnsteigerungen u.v.m. sein. Häufig vorkommende Ursachen auf den Baustellen sind fehlende, verspätete und mangelhafte Ausführungspläne, Vorunternehmerleistungen, oder fehlende Mitwirkung des AG. Die VOB/B behandelt in § 6 Abs. 1 – 5 VOB/B die Rechtsfolgen von zeitlichen Auswirkungen der Störungen auf den Bauablauf. Finanzielle Ansprüche sind in Abs. 6 i.V.m. Regelungen des BGB geregelt.

Eine Behinderungsanzeige gemäß § 6 Abs. 1 VOB/B ist grundlegende Voraussetzung für einen Anspruch des AN auf Verlängerung der Ausführungsfristen und einen möglichen Mehrkostenausgleich. Zudem dient sie dem Zweck der Dokumentation und schafft dem AG die Möglichkeit schnellstmöglich Abhilfe zu schaffen oder einen Eintritt der Behinderung zu vermeiden.

Vergütungsfolgen

Eine Verlängerung der Ausführungsdauer und zusätzliche Vergütungsfolgen können nur aus Umständen aus dem Risikobereich des AG resultieren. Zu unterscheiden gilt hierbei in § 6 Abs. 6 Satz 1 und Satz 2 VOB/B.

Das nachfolgende Schema stellt die möglichen Behinderungsereignisse mit und ohne Vergütungsfolgen, die innerhalb der VOB geregelt werden, dar.

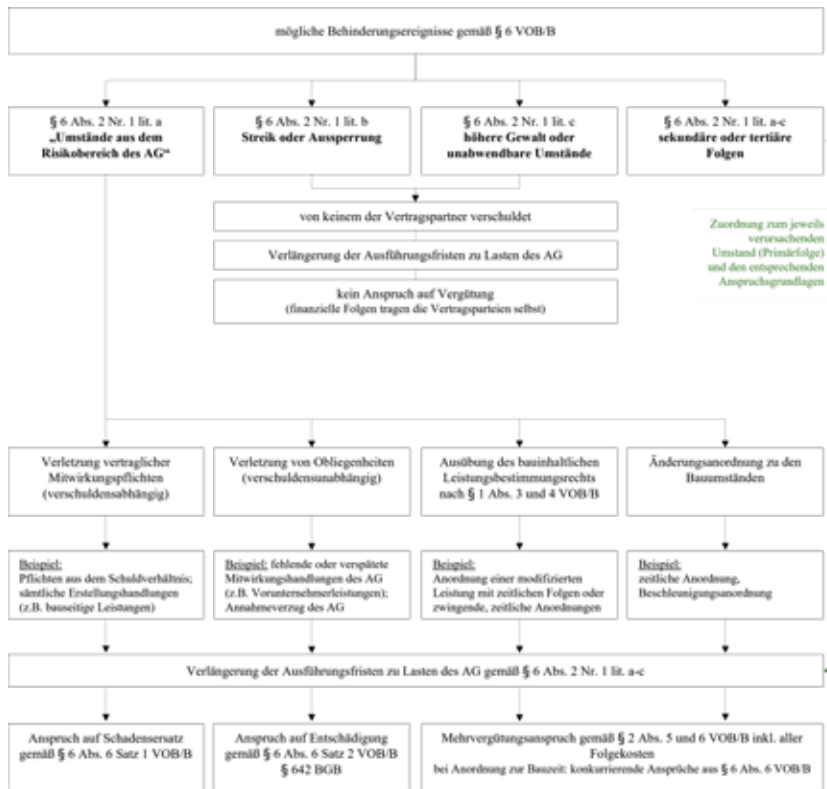


Abbildung 4: mögliche Behinderungsereignisse der VOB/B

Die VOB/B ermöglicht in § 6 Abs. 6 VOB/B die Existenz des Verschuldens-Schadensersatzes neben der Obliegenheitshaftung nach § 642 BGB mit Ankündigungserfordernis. Der Grund dafür liegt in der Rechtsprechung des BGH [Urt. v. 21.01.99]. Dieser definiert darin sämtliche Mitwirkungshandlungen des AG als reine Obliegenheiten. Bei Unterlassen einer erforderlichen Mitwirkungshandlung gerät der AG in Annahmeverzug und haftet im Verhältnis zum NU über § 642 BGB. Die sich ergebende Problematik lautet: „§ 6 Abs. 6 S.1 VOB/B enthält Schadensersatzansprüche, weil der Auftraggeber gegen seine Mitwirkungs-pflichten verstößt, gleichzeitig sind Mitwirkungs-handlungen Nicht-Pflichten = Obliegenheiten und begründen Ansprüche aus § 642 BGB.“ [5]

Innerhalb der Literatur stößt die Entscheidung des BGH vielfach auf Kritik. Für die Praxis kann nun nur noch der Entschädigungsanspruch gemäß Satz 2 relevant sein, da für eine Pflichtverletzung nach Satz 1 kaum mehr eine Handlung verbleibt. Da jedoch ohne die andauernde Mitwirkung des AG eine erfolgreiche Erstellung des Bauvorhabens oftmals nicht möglich ist, definieren

einige Autoren die Mitwirkungshandlungen beim Bauvertrag als vertragliche Nebenpflichten [1, 5, 6, 7, 8]. Sodann kann man zwischen verschuldensabhängigen Pflichtverletzungen und einem Annahmeverzug des AG unterscheiden. In der nachfolgenden Tabelle ergeben sich die wesentlichen Unterschiede der Ansprüche aus § 6 Abs. 6 Satz 1 und 2 VOB/B. Grundlegend unterschiedlich ist die Berechnung der Mehrkosten, wobei bei Schadensersatzansprüchen die tatsächlich entstandenen Kosten maßgeblich sind, während bei Entschädigungsansprüchen auf die Preisgrundlagen der Kalkulation

abgestellt wird. Zudem begrenzt sich der Anspruch aus § 642 BGB nur auf die Dauer des Annahmeverzugs, indes sind beim Schadensersatz sämtliche Kosten und Folgekosten erstattungsfähig.

§ 6 Abs. 6 S. 1 VOB/B	Schadensersatzanspruch verschuldensabhängig („vertreteten müssen“) Verletzung einer Vertragspflicht tatsächlich entstandene Kosten der Behinderung maßgebend
§ 6 Abs. 6 S. 2 VOB/B, § 642 BGB	Entschädigungsanspruch verschuldensunabhängig Unterlassen einer notwendigen Mitwirkungshandlung Annahmeverzug des AG Grundlagen der Kalkulation maßgebend zur Ermittlung der Kosten angemessene Entschädigung begrenzt auf die Dauer des Annahmeverzugs

Abbildung 5: wesentliche Unterschiede zwischen § 6 Abs. 6 Satz 1 und Satz 2 VOB/B

Die Wahl der jeweiligen Anspruchsgrundlage ist entscheidend für die Nachweisführung und Vergütungsberechnung.

Kausalitätsnachweis

Zahlreiche Klageabweisungen der letzten Jahre verdeutlichen die hohen Anforderungen an die Dokumentation des AN. Obwohl meist kein Zweifel an einer Behinderung aus dem Risikobereich des AG bestehe, scheiterte der Anspruch regelmäßig an einer aussagefähigen

Dokumentation jeder einzelnen Behinderung und deren Folgen für den Bauablauf [5]. Der Kausalitätsnachweis hat dem Grund und der Höhe nach zu erfolgen und wird unterteilt in den Nachweis der haftungsbegründenden und der haftungsausfüllenden Kausalität. Der AN muss nachweisen, dass er durch eine Pflichtverletzung des AG in seinem Produktionsprozess behindert wurde, wie lange und in welchem Umfang die Behinderung eingetreten ist und, dass ihm daraus ein Schaden entstanden ist, der ohne die Behinderung nicht eingetreten wäre. Eine konkrete, bauablaufbezogene Darstellung der jeweiligen Behinderung ist laut BGH unumgänglich. Es muss jede Behinderung separat betrachtet werden. Erst wenn der Ursachenzusammenhang zwischen der Pflichtverletzung und einer daraus resultierenden Verzögerung nachgewiesen ist, können die zeitlichen und finanziellen Auswirkungen betrachtet werden.

Schadensberechnung

Bei der Berechnung von Schadensersatzansprüchen kommt es auf den Vergleich zweier Vermögenslagen an: einerseits die tatsächlichen, durch die Störung verursachten Kosten und andererseits die „hypothetischen Kosten“, welche bei unbehinderter Ausführung entstanden wären. Diese Soll-Kosten sind nicht bekannt und müssen annähernd plausibel geschätzt werden, da der Umstand ohne Behinderung nie eingetreten ist. In den meisten Fällen wird für die Angebotskalkulation des AN die Richtigkeitsvermutung gelten. Mit Hilfe eines Soll-Ist-Vergleichs eines vergleichbaren, unbehinderten und eines behinderten Abschnittes kann ggf. bewiesen werden, dass die Kalkulationsansätze realistisch sind [6].

Anwendungsfall

Anhand eines einfachen Beispielprojektes „Bau einer Stahlbetonwand“ sollte das Fallbeispiel einer verspäteten Mitwirkung des AG mit den Anspruchsgrundlagen aus

- 1) § 6 Abs. 6 Satz 1 VOB/B
Schadensersatzanspruch
- 2) § 6 Abs. 6 Satz 2 VOB/B, § 642 BGB
Entschädigungsanspruch
- 3) § 2 Abs. 5 VOB/B
Mehrvergütungsanspruch

in Bezug auf die Vorgehensweise, Dokumentation und Vergütung dargestellt und verglichen werden. Zudem wurden zugehörige Musterbriefe und Kalkulationsgrundlagen erarbeitet.

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass es letztendlich keine großen Unterschiede zwischen den Anspruchshöhen gibt. Die Vergütungsberechnung und Nachweisführung stellt bei Ansprüchen auf kalkulativer Basis deutlich weniger Aufwand und Anforderungen an den AG dar als bei Schadensersatzansprüchen auf Basis der tatsächlichen Kosten. Das vorliegende Beispiel war stark vereinfacht und nicht vergleichbar mit einem komplexen Bauvorhaben, bei welchem viele Vorgangsreihen und Verknüpfungen parallel laufen und voneinander abhängen. Dementsprechend nehmen Dokumentation und Nachweisführung viel Zeit in Anspruch und mit der Komplexität des Bauablaufs zu. Sollte die Anspruchsgrundlage des § 2 Abs. 5 VOB/B anwendbar sein, kann es in vielen Fällen sinnvoll werden, sich darauf zu berufen, anstatt Schadensersatz geltend zu machen. Eine baubegleitende Dokumentation mit Hilfe von Bautagebuch, Fotodokumentation, regelmäßige Besprechungen und Baustellenrundgänge kann als Basis für eine spätere Nachweisführung nur empfohlen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Alle zeitlichen Änderungen des Bauablaufs, ob Bauverzögerungen, Beschleunigungen oder Bauzeitverlängerungen führen zu teils erheblichen Mehrkosten, auf deren Vergütung der AN angewiesen ist. Die Durchsetzung gestaltet sich jedoch oftmals als schwierig und aufwändig. Die Gerichte stellen für den Nachweis der bauablaufbezogenen Darstellung hohe Anforderungen an die Dokumentation des AN, die im Baustellenalltag nicht jederzeit möglich

erscheint. Wünschenswert wäre daher eine Erleichterung der Dokumentation, möglicherweise durch den Einsatz von Managementsystemen oder BIM Methoden. Ein einheitlicher Leitfaden der Rechtsprechung zur Nachweisführung würde die Praxis zudem deutlich unterstützen. Es bleibt abzuwarten, ob eine Überarbeitung der VOB/B in den nächsten Jahren

die Wünsche und Anregungen für die Praxis erfüllt. Nichtsdestotrotz wird die Kenntnis der baurechtlichen Literatur und der Anspruchsgrundlagen in den Fällen von Störungen im Bauablauf in den kommenden Jahren aufgrund zunehmenden „Wirtschaftlichkeits-Denkens“ der Bauwirtschaft stets wichtiger werden.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen und für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1]: KAPPELLMANN | SCHIFFERS (6. Auflage, 2011) „Vergütung, Nachträge und Behinderungsfolgen beim Bauvertrag, Band 1: Einheitspreisvertrag“, Werner Verlag
- [2]: DRITTLER (3. Auflage, 2017) „Nachträge und Nachtragsprüfung beim Bau- und Anlagenbauvertrag“, Werner Verlag
- [3]: REISTER (4. Auflage, 2019) „Nachträge beim Bauvertrag“, Werner Verlag
- [4]: VYGEN | JOUSSEN | LANG | Rasch (7. Auflage, 2015) „Bauverzögerung und Leistungsänderung“, Werner Verlag
- [5]: KAPPELLMANN | MESSERSCHMIDT (7. Auflage, 2020) „VOB Teile A und B“, Beck'sche Kurzkommentare, Verlage C.H. Beck
- [6]: ALTHAUS | BARTSCH (1. Auflage, 2020) „Nachträge am Bau“, C.H. Beck
- [7]: INGENSTAU | KORBION (21. Auflage, 2020) „VOB Teile A und B“, Kommentar, Werner Verlag
- [8]: NICKLISCH | WEICK | JANSEN | SEIBEL (5. Auflage, 2019) „VOB Teil B“, Kommentar, C.H. Beck
- [9]: DIVERSE AUTOREN „Zeitschrift für deutsches und internationales Bau- und Vergaberecht“, kurz ZfBR, C.H. Beck
- [10]: NEUE JURISTISCHE WOCHENZEITSCHRIFT „Neue Zeitschrift für Baurecht und Vergaberecht“, kurz NZBau, C.H. Beck

Autor

Maria Wagner, geb. 09.02.1998

Seit 01/2022	Bauleiter bei Wolff & Müller Hoch- und Industriebau am Standort Nürnberg
03/2020 – 12/2021	Masterstudium Internationales Bauwesen an der TH Nürnberg
09/2018 – 10/2020	Werkstudent bei Christoph Fuchs Bauunternehmen
10/2016 – 03/2020	Bachelorstudium Bauingenieurwesen an der TH Nürnberg

Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm unter Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fischer angefertigt.

Die Arbeit wurde mit einer Teilnahmeurkunde ausgezeichnet.



ISBN 978-3-89650-534-7 // € (D)



9 783896 505347

02000