



DAS  
**BAYERISCHE**  
BAUGEWERBE

**HOCHSCHULPREIS**  
des Bayerischen Baugewerbes

**2026**

**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](http://www.lbb-bayern.de)

## Mit Beiträgen von

Magdalena Aicher • Manuel Bauer • Tanja Böhm • Felix Bohndorf • Alicia Dietrich • Juliana Grosser •  
Isabella Hofbauer • Barbara Hölzl • Katrin Niedermeier • Diana Oberschmid • Anna Stenglein • Alisa  
Teufel • Hannes Venneklaas • Anand Vijayan • Thomas Wieland

## Redaktion

RA Andreas Demharter (verantwortlich)

## Gestaltungskonzept, Layout und Realisation

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

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

## Bildquellen

Autoren, falls nicht abweichende Angabe am jeweiligen Bild

## Druck

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

München, im Mai 2026

## 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 sowie in nachvollziehbarer, verständlicher Darstellung werden ausgezeichnet. Der Preis wird 2026 zum 18. Mal vergeben.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die vom Wettbewerbsausschuss ausgezeichneten 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 24 Bachelor- und Masterarbeiten von

- der Technischen Hochschule Deggendorf,
- der Technischen Universität München,
- der Hochschule für angewandte Wissenschaften München,
- der Universität der Bundeswehr München,
- der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg und
- der Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt

eingereicht. Aus den vierundzwanzig Arbeiten hat der Wettbewerbsausschuss entschieden, drei Arbeiten mit einem Geldpreis und zwölf Arbeiten mit einer Urkunde auszuzeichnen.

Erstmalig beim Hochschulpreis 2024 und in diesem Jahr verstärkt werden von den Teilnehmern KI-Technologien zur sprachlichen Überprüfung sowie vereinzelt zur Quellenrecherche eingesetzt.

Mit dem **1. Preis** und einem Geldbetrag von 3.000,- Euro wird Frau Tanja Böhm für ihre Masterarbeit „Feuchteverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken aus Brettsperholz mit Kerven und unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen“ ausgezeichnet.

Den **2. Preis** und einen Geldbetrag von 2.000,- Euro erhält Herr Anand Vijayan für seine Masterarbeit „Untersuchung der Möglichkeiten in IFC für die Planung und Modellierung von Bauprozessen“.

Den **3. Preis** und einen Geldbetrag von 1.000,- Euro erhält Frau Magdalena Aicher für ihre Bachelorarbeit „Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren von Pfahlkopfplatten“.

### Der Wettbewerbsausschuss:

Benedikt Baumann  
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann  
 Brigitte Nagy  
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart  
 Axel Neißer-Deiters  
 Klara Maria Santer  
 Thomas Schneider  
 Olaf Techmer  
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel  
 Christopher Wening

---

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                              |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Magdalena <b>Aicher</b> , Bachelorarbeit<br>Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren von Pfahlkopfplatten                                                                                | Seite 3  |
| Manuel <b>Bauer</b> , Masterarbeit<br>Untersuchungen zu NSM CFK-Lamellen unter Berücksichtigung von Expositionen und Schlitzbreite                                                           | Seite 8  |
| Tanja <b>Böhm</b> , Masterarbeit<br>Feuchteverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken aus Brettsper Holz mit Kernen und unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen                                | Seite 13 |
| Felix <b>Bohndorf</b> , Masterarbeit<br>Konzeption und Planung eines Gebäudes mit nichtmetallischer Bewehrung                                                                                | Seite 18 |
| Alicia <b>Dietrich</b> , Bachelorarbeit<br>Experimentelle Untersuchungen an Stampflehm zur Veränderung der Materialeigenschaften bei wiederholten Feuchte- und Trocknungszyklen              | Seite 23 |
| Juliana <b>Grosser</b> , Masterarbeit<br>Einfluss der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung auf die Reaktivität von Ziegmehlen zur Bewertung ihres Potentials als Zementzusatzstoff | Seite 28 |
| Isabella <b>Hofbauer</b> , Bachelorarbeit<br>Experimentelle Analyse des Tragverhaltens von Planziegmelmurwerk mit Lehmdu nnbettmörtel unter verschiedenen Feuchteinflüssen                   | Seite 33 |
| Barbara <b>Hölzl</b> , Bachelorarbeit<br>Untersuchung und Bewertung des Festigkeitspotentials von Leichtbetonrezyklaten                                                                      | Seite 38 |
| Katrin <b>Niedermeier</b> , Masterarbeit<br>Analyse und Bewertung der Klima(wandel)performanz von Neubauprojekten von Wohnungsbauunternehmen in München                                      | Seite 43 |
| Diana <b>Oberschmid</b> , Masterarbeit<br>LLM-gestützte Brückenplanung: Retrieval-Augmented Generation zur Integration deutscher Bauvorschriften                                             | Seite 48 |
| Anna <b>Stenglein</b> , Bachelorarbeit<br>Bewertung der Abschiebetechnik von Thermomulden und unterschiedlicher Methoden zur Temperaturabsenkung von Walzasphalten                           | Seite 53 |
| Alisa <b>Teufel</b> , Masterarbeit<br>Entwicklung und Validierung eines standardisierten BIM-Workflows zur ökologischen Optimierung von Gebäuden in Leistungsphase 2                         | Seite 58 |
| Hannes <b>Venneklaas</b> , Masterarbeit<br>Instandsetzung von Firsthohlstellen bei Tunneln in Neuer Österreichischer Tunnelbauweise                                                          | Seite 63 |
| Anand <b>Vijayan</b> , Masterarbeit<br>Untersuchung der Möglichkeiten in IFC für die Planung und Modellierung von Bauprozessen                                                               | Seite 68 |
| Thomas <b>Wieland</b> , Bachelorarbeit<br>Realisierung einer autarken Baustelleneinrichtung für eine nachhaltige Baustelle im Verkehrswegebau                                                | Seite 73 |

# VERGLEICH VERSCHIEDENER BERECHNUNGS- VERFAHREN VON PFAHLKOPFPLATTEN

## Bachelorarbeit

*Magdalena, Aicher*

Pfahlgründungen zählen zu den am häufigsten eingesetzten Tiefgründungsarten. Für die Lastverteilung auf die Pfähle werden insbesondere im Brückenbau Pfahlkopfplatten verwendet. Aufgrund ihrer gedrungenen Geometrie ist die Anwendung der Standardbemessungsverfahren in der Regel nicht mehr zulässig. In diesen Fällen stellen ebene Stabwerkmodelle eine bewährte Alternative dar, erfassen den räumlichen Lastabtrag der Pfahlkopfplatte jedoch nur vereinfacht. Ziel dieser Bachelorarbeit ist es daher zu untersuchen, inwieweit räumliche Stabwerkmodelle eine geeignete Bemessungsalternative für Pfahlkopfplatten darstellen. Hierzu wird auf Grundlage einer Literaturrecherche ein räumlicher Stabwerksansatz entwickelt und anhand eines Bemessungsbeispiels mit ebenen Stabwerksmodellen sowie einer numerischen Berechnung mit IDEA StatiCa verglichen. Die Untersuchung zeigt, dass räumliche Stabwerkmodelle das Tragverhalten von Pfahlkopfplatten präziser abbilden, ihre wirtschaftliche Anwendung jedoch durch den Modellierungsaufwand in den Knotenbereichen begrenzt wird. Für die Baupraxis eignen sie sich daher vorwiegend für detaillierte Untersuchungen, während für die reguläre Bemessung ebene Stabwerkmodelle weiterhin wirtschaftlicher sind. Die Arbeit liefert damit eine Grundlage für die gezielte Auswahl geeigneter Bemessungsansätze.

**Keywords:** Pfahlkopfplatte, Stabwerkmodell, Knoten, Modellierung, IDEA StatiCa

### Zielsetzung

Die Besonderheit bei der Bemessung der Pfahlkopfplatte liegt in der gedrungenen Geometrie des Bauteils. Durch die geringen Stützweiten im Verhältnis zur Bauteilhöhe kommt es unter Belastung zu nichtlinearen Dehnungsverteilungen im Querschnitt, sodass die Voraussetzungen für die Anwendung der klassischen Biegetheorie nicht mehr erfüllt sind. Pfahlkopfplatten stellen daher einen

Diskontinuitätsbereich dar, der gemäß Eurocode 2 mithilfe von Stabwerkmodellen zu bemessen ist. [1,2]

In der praktischen Anwendung erfolgt die Bemessung häufig durch ebene Stabwerkmodelle. Der tatsächlich vorhandene räumliche Lastabtrag wird dabei jedoch nur vereinfacht berücksichtigt. Daher wurde im Umfang der Bachelorarbeit untersucht, inwieweit die Anwendung von räumlicher

Stabwerkmodelle eine wirtschaftlichere Bemessung ermöglichen.

Ergänzend erfolgt ein Vergleich mit einer numerischen Berechnung mithilfe der 3D-Detail-Anwendung von IDEA StatiCa, die als Weiterentwicklung klassischer Stabwerksmodelle gilt. Die nichtlineare Finite-Elemente-Analyse bildet das Tragverhalten unter Berücksichtigung von Rissbildung, Materialnichtlinearitäten und realitätsnahen Baustoffsteifigkeiten ab und ermöglicht dadurch normkonforme Nachweise für Diskontinuitätsbereiche im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. [3]

### Bemessungsbeispiel

Für den Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsverfahren wurde eine rechteckige Pfahlkopfplatte mit den Abmessungen  $5,0 \times 4,0$  m und einer Bauteildicke von 1,5 m gewählt. Die Pfahlkopfplatte ist auf vier Pfählen gelagert und wird durch einen zentrisch angeordneten Pfeiler belastet. Eine schematische Darstellung der untersuchten Pfahlkopfplatte ist in Abbildung 1 dargestellt. Als Bemessungsgrundlage wurden zwei Lastfälle betrachtet. In Lastfall 1 wird die Pfahlkopfplatte ausschließlich durch eine Druckkraft beansprucht. Lastfall 2 berücksichtigt eine kombinierte Beanspruchung aus einer Druckkraft und einem Biegemoment. Die Materialeigenschaften wurden im Vorfeld festgelegt.

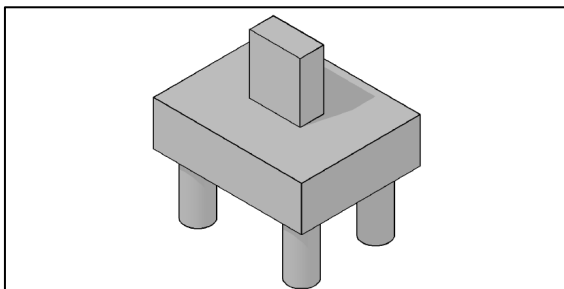


Abb. 1: zu bemessende Pfahlkopfplatte, eigene Darstellung

### Ebene Stabwerksbemessung

Die Durchführung der ebenen Stabwerksbemessung wurde nach [4] durchgeführt und im Rahmen dieser Arbeit analysiert.

Zur Modellierung des ebenen Stabwerkmodells wurde die Pfahlkopfplatte für beide Lastfälle

jeweils in zwei zueinander senkrechte Ebenen unterteilt. In den entstandenen Schnittebenen wurden standardisierte Stabwerksmodelle gelegt und an die spezifische Geometrie der Pfahlkopfplatte angepasst (siehe Abbildung 2). Das Vorgehen bei der Bemessung der ebenen Stabwerkmodelle erfolgte in Anlehnung an [1] und begann mit der Bemessung der Zugstreben. Anschließend wurden die Knotenbereiche durch die Bemessung der Druckstreben sowie durch den Nachweis der Bewehrungsverankerung überprüft. Die Bemessung des ebenen Stabwerks stützt sich dabei auf die Regelungen des Nationalen Anhangs zum Eurocode 2. Bei der Bemessung der Druckstreben in Druckknoten wurde der im Eurocode 2 enthaltene Hinweis auf den günstigen Einfluss mehraxialer Druckspannungszustände aufgegriffen. Zur näherungsweisen Berücksichtigung dieses Effekts wurde eine Erhöhung der zulässigen Bemessungsspannung um 10 % angesetzt. [4]

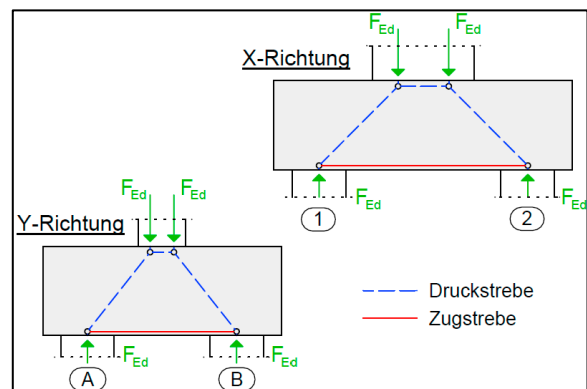


Abb. 2: senkrechte Schnittebenen mit Stabwerkmodell im Lastfall 1 nach [4], eigene Darstellung

### Räumliche Stabwerksbemessung

Auf Grundlage der aus dem Pfeiler resultierenden Schnittgrößen wurden zunächst für beide Lastfälle die Lage und die Größe der resultierenden Kräfte auf der Pfahlkopfplatte ermittelt. Darauf aufbauend wurde unter Verwendung vorhandener Referenzmodelle händisch das räumliche Stabwerksmodelle entwickelt. Abbildung 3 zeigt das entwickelte räumliche Stabwerkmodell für den Lastfall 2.

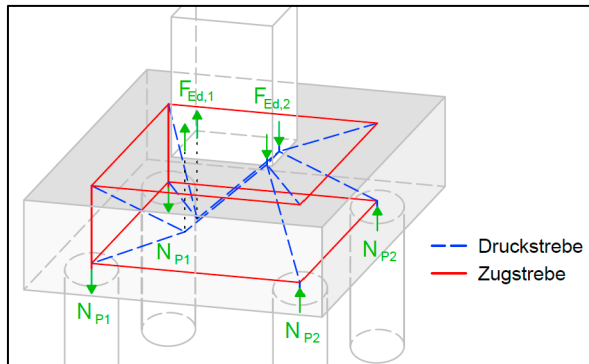


Abb. 3: räumliches Stabwerksmodell im Lastfall 2, eigene Darstellung

Die Bemessung dieser räumlichen Stabwerkmodelle folgt grundsätzlich dem Vorgehen ebener Modelle. Aufgrund der Berücksichtigung räumlicher Effekte sind jedoch erweiterte Knotennachweise erforderlich, und die Druckstreben müssen gesondert bemessen werden.

Die Notwendigkeit erweiterter Knotennachweise ergibt sich zum einen aus dem Einfluss mehraxialer Druckspannungszustände. Treffen mehrere außerhalb einer Ebene verlaufende Druckstreben in einem Druckknoten zusammen, wird der Beton allseitig unter Druck beansprucht, wodurch sich eine erhöhte Druckfestigkeit einstellt. Der gewählte Bemessungsansatz basiert daher auf dem für den Beton angepassten Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium, mit dem der Einfluss mehraxialer Druckspannungszustände berücksichtigt werden kann. [1,4]

Druck-Zug-Knoten im räumlichen Stabwerkmodell wurden ebenfalls untersucht, da die gleichzeitige Einleitung von Druck- und Zugkräften zu einem komplexen Spannungszustand führt. Im räumlichen Fall sind dabei zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen, insbesondere die Anordnung und Neigung der Druckstreben sowie Knoten, in denen drei oder mehr Zugstreben zusammentreffen [5]. Da für räumliche Stabwerkmodelle keine standardisierten Knotentypen existieren, ist eine individuelle Modellierung der Knoten erforderlich. Anhand des Druck-Zug-Knotens im Lastfall 1 (siehe Abbildung 4) lassen sich die Besonderheiten dieser Vorgehensweise verdeutlichen.

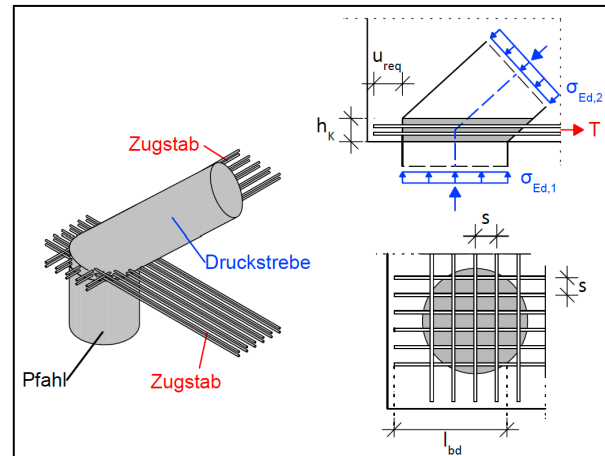


Abb. 4: Druck-Zug-Knoten im Lastfall 1, eigene Darstellung

Die Modellierung ermöglicht sowohl die Überprüfung der Verankerungslängen  $l_{bd}$  infolge der runden Pfahlgeometrie als auch die Ermittlung des Bewehrungsüberstands  $u_{req}$  und der Verteilungsabstände  $s$  der Bewehrung, die als Eingangsgrößen zur Bestimmung der Knotenhöhe  $h_K$  dienen. Abhängig von der Knotenhöhe wird anschließend die ovale Übergangsfläche zwischen dem Druck-Zug-Knoten und der Druckstrebe geometrisch bestimmt, da eine rechnerische Ermittlung mit zunehmender Knotenkomplexität einen deutlich höheren Aufwand erfordern würde.

Abschließend sind Druckfelder bei der räumlichen Bemessung gesondert zu betrachten, da sich infolge der räumlichen Ausbreitung veränderte Spannungsverteilungen und maximale Spannungen ergeben, die die Tragfähigkeit beeinflussen. Für räumliche, flaschenförmige Druckstreben wurde daher ein anderer Bemessungsansatz herangezogen, wie er aus der normativen Bemessung ebener Stabwerkmodelle bekannt ist. Der gewählte Ansatz berücksichtigt unter anderem die unterschiedlichen Einschnürungsverhältnisse in den beiden Hauptrichtungen des Druckfeldes, da bei gleichmäßiger Lastausbreitung höhere Tragfähigkeiten erreicht werden als bei ungleichmäßiger Ausbreitung. Zudem wird die Umlagerung von Druckkräften infolge von Spaltrissbildung durch den Parameter der Stablänge erfasst [5]. Zur Anwendung des Bemessungsansatzes wurden die Druckstreben auch hier einzeln modelliert. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Modellierung der Druckstrebe.

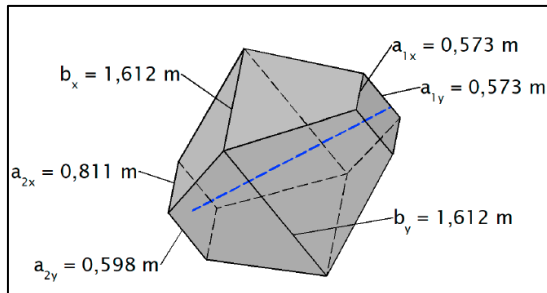


Abb. 5: Druckstrebe im Lastfall 1, eigene Darstellung

### Bemessung mittels IDEA StatiCa

Vor der Bemessung mit der 3D-Detail-Anwendung sind modellbasierte Eingaben erforderlich. Die Geometrie der Pfahlkopfplatte wurde modelliert, die runden Pfähle aufgrund softwareseitiger Einschränkungen durch n-Ecke angenähert und über Koordinaten definiert. Für die Lasteingabe wurden zwei getrennte Lastfälle mit den Bemessungslasten erstellt, ohne Kombination der Lastfälle und mit Teilsicherheitsbeiwerten von 1,0. Im Lastfall mit reiner Druckbeanspruchung erfolgte die Lasteingabe über eine Flächenlast. Im zweiten Lastfall wurde die nicht direkt abbildbare dreiecksförmige Druckspannungsverteilung durch eine äquivalente Flächenlast mit identischem Schwerpunkt ersetzt. Die Zugkräfte wurden aus den einzelnen Bewehrungsstäben abgeleitet und als Einzellasten aufgebracht. Da bei der nichtlinearen Finite-Elemente-Analyse die Bewehrung vorab zu definieren ist, wurde die aus der ebenen Stabwerksbemessung ermittelte Bewehrung in das Modell übernommen. Die Eingabe erfolgte dabei je nach Lage entweder flächenbezogen oder über Koordinaten.

Die Bemessung erfolgt anschließend automatisiert. IDEA StatiCa führt die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit über einen Spannungsvergleich zwischen den vorhandenen Beton- und Stahlspannungen und den jeweils zulässigen Grenzspannungen. Zusätzlich wird der Nachweis der Verankerung automatisch geführt und die Spannungszustände grafisch dargestellt. Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind grundsätzlich möglich, wurden jedoch aufgrund der angesetzten Bemessungsschnittgrößen nicht durchgeführt. [3]

### Ergebnisse und Vergleich

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bemessung mit ebenen Stabwerksmodellen insgesamt eine wirtschaftliche Vorgehensweise darstellt. Der Modellierungs- und Rechenaufwand ist gering, da auf standardisierte Knotentypen und Bemessungsansätze zurückgegriffen werden kann. Die Tragfähigkeit der ermittelten Bewehrung konnte zudem durch die anschließende Überprüfung mit IDEA StatiCa nachgewiesen werden.

Die räumliche Stabwerksbemessung bildet den Kraftfluss realitätsnäher ab und ermöglicht die Identifikation kritischer Beanspruchungsbereiche. Dem steht jedoch ein hoher Modellierungs- und Rechenaufwand gegenüber, insbesondere aufgrund der aufwendigen und unsicheren Knotenmodellierung infolge fehlender normativer und literarischer Grundlagen. Die daraus resultierenden konservativen Annahmen führten zu iterativen Anpassungen und einer erhöhten Betongüte von C30/37 auf C40/50, ohne den Bewehrungsbedarf gegenüber der ebenen Bemessung wesentlich zu reduzieren. Lediglich an der Unterseite der Pfahlkopfplatte in Pfeilerachse konnte im räumlichen Stabwerkmodell eine reduzierte Bewehrung von 6 Ø 20 statt 15 Ø 25 ermittelt werden.

Die 3D-Detail-Anwendung von IDEA StatiCa erwies sich trotz erhöhtem Modellierungsaufwand insgesamt als die leistungsfähigste Methode hinsichtlich Genauigkeit und Ergebnisumfang. Die begrenzte Verfügbarkeit von Fachartikeln erschwert aktuell die Bedienung und Fehlerdiagnose im Falle eines divergierenden Modells.

Insgesamt ist keine der untersuchten Methoden in allen Bewertungskriterien überlegen. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt vielmehr vom Anwendungsfall, dem verfügbaren Zeitrahmen und dem erforderlichen Detaillierungsgrad ab. Als besonders sinnvoll erscheint eine kombinierte Vorgehensweise, bei der das ebene Stabwerkmodell für die Vorbemessung und IDEA StatiCa für die anschließende Detailbemessung eingesetzt wird.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [2]: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Deutsches Institut für Normung, 2021.
- [3]: IDEA StatiCa (2025) Detail, <https://www.ideastatica.com/de/support-center> [Zugriff am: 17.05.2025].
- [4]: Finckh, W.: Mit Stabwerksmodellen zur Bewehrungsführung – Detailnachweise im Stahlbetonbau, Springer Verlag, Wiesbaden, 2025.
- [5]: *Nguyen, D.T.*: Räumliche Stabwerkmodelle zur Bemessung von Betontragwerken. Verlag Grauer, Beuren, Stuttgart, 2002.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Literaturquelle 5
2. Literaturquelle 4
3. Literaturquelle 1

### Autor

Magdalena Aicher, B. Eng.

|           |                                                                                             |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| seit 2025 | Master Bauingenieurwesen „Bauen im Bestand“, OTH Regensburg                                 |
| 2021-2025 | Bachelor Bauingenieurwesen, OTH Regensburg                                                  |
| 2019-2021 | Ausbildung: Bauzeichner Fachrichtung Ingenieurbau, Haumann & Fuchs Ingenieure AG Traunstein |
| 2011-2019 | Allgemeine Hochschulreife, Hertzheimer-Gymnasium Trostberg                                  |

### Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen der Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg im Fachbereich Stahlbetonbau und Spannbetonbau bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh angefertigt.

**Die Arbeit wird mit dem 3. Preis ausgezeichnet.**

# UNTERSUCHUNGEN ZU NSM CFK-LAMELLEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON EXPOSITIONEN UND SCHLITZBREITE

## Masterarbeit

*Manuel Bauer*

**Zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Massivbrücken ist häufig eine Querkraftverstärkung erforderlich. Der Einsatz hocheffizienter, in Schlitze verklebter NSM CFK-Lamellen bietet dabei im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren, welche meist mit massiven Eingriffen in den Bestand einhergehen, großes Potenzial für eine nachhaltige und ressourceneffiziente Ertüchtigung des Bauwerksbestands. Hinsichtlich einer praktischen Anwendbarkeit untersucht diese Arbeit systematisch den Einfluss brückenspezifischer Expositionen auf das Verbundsystem. Mittels experimenteller Untersuchungen wurde der Einfluss der Schlitzbreite sowie thermischer Belastung (45 °C) auf das Verbundverhalten analysiert. Die Ergebnisse belegen, dass das System trotz einer thermisch bedingten Minderung der Verbundtragfähigkeit um ca. 20 % sowie Einflüssen der Schlitzbreite eine hohe Leistungsfähigkeit beibehält, was dessen Eignung zur Anwendung im Brückenbau unterstreicht. Die Arbeit liefert damit eine wesentliche Grundlage für die zeitnahe Überführung dieses hocheffizienten Verstärkungsverfahrens in die Brückenbaupraxis.**

**Keywords:** Brücken, Querkraftverstärkung, NSM CFK, Temperatur, Schlitzbreite, Ressourceneffizienz

## Einführung

Die Alterung der deutschen Verkehrsinfrastruktur stellt den konstruktiven Ingenieurbau vor massive Herausforderungen. Steigender Schwerlastverkehr und neue normative Anforderungen führen dazu, dass circa 57 % der Massivbrücken rechnerische Defizite in der Querkrafttragfähigkeit aufweisen [1]. Einen technologisch wie wirtschaftlich hocheffizienten Lösungsansatz zur

Kompensation dieser Defizite stellt die Verstärkung mit in Schlitze verklebten („near surface mounted“ – NSM) CFK-Lamellen dar. Im Vergleich zu etablierten Verfahren ermöglicht das NSM CFK-System eine schnelle Applikation bei nur geringfügigen baulichen Eingriffen. Im Sinne eines effizienten Erhaltungsmanagements können so wertvolle Ressourcen eingespart und ein entscheidender Beitrag zu einer nachhaltigen Bauwirtschaft geleistet werden. Für eine zeitnahe

baupraktische Anwendung ist jedoch zunächst die Übertragung bestehender Erfahrungen auf brückenbauspezifische Anforderungen notwendig. Hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss entsprechender Expositionen auf das Verbundtragverhalten der NSM CFK-Lamellen systematisch untersucht. Mit der Entwicklung eines spezialisierten Versuchskonzepts wird im Rahmen experimenteller Untersuchungen eine fundierte Referenzdatenbasis geschaffen, die insbesondere die Schlitzbreite sowie thermische Belastung explizit berücksichtigt.

## Thermische Exposition

Die Tragfähigkeit von Epoxidharzverbindungen hängt maßgeblich von der thermischen Belastung ab, da sich die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs bei Annäherung an die Glasübergangstemperatur signifikant verschlechtern. Eine realitätsnahe Abbildung der Betonoberflächentemperatur im Bereich der verklebten CFK-Lamelle ist demzufolge von entscheidender Bedeutung. Da sich die aktuelle Normung (DIN EN 1991-1-5 [2]) primär auf globale Bauteiltemperaturen konzentriert, werden lokale Extremwerte allerdings nicht explizit erfasst. Auch vorhandene In-situ-Messungen liefern aufgrund der Platzierung der Sensoren in größeren Bauteiltiefen kaum eindeutige Werte für die oberflächennahe Temperatur.

Ein maßgebender Faktor für die Temperaturbelastung im Brückenbau ist die geometriebedingte Verschattung der Stege durch die auskragende Fahrbahnplatte (siehe Abb. 1). Diese führt zu einer zeitlichen Entkopplung von maximaler Umgebungstemperatur und intensivster direkter Strahlungsbelastung. Infolgedessen treten an den vertikalen Stegflächen signifikant niedrigere Oberflächentemperaturen auf als beispielsweise an der Oberseite der Fahrbahnplatte.

Auf dieser Basis wurde die obere Prüftemperatur auf  $+45\text{ °C}$  festgelegt. Dieser Wert deckt

sämtliche literaturbekannten Extremwerte für Stegseiten von Brücken sicher ab. Zugleich wird durch die Berücksichtigung der realen Verschattungssituation eine fundierte, extreme Lastannahme für die Versuche geschaffen.

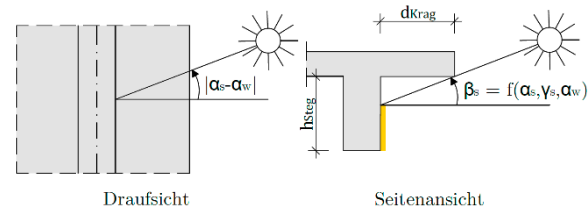


Abb. 1: Besonnung eines Plattenbalkens in Anlehnung an [3]

## Temperaturinduktion

Um die thermischen Einflüsse unter kontrollierten Laborbedingungen abbilden zu können, wurde eine spezielle Heizvorrichtung zur Temperaturinduktion entwickelt. Die Konstruktion aus gelenkig verbundenen Holzplatten mit einer darauf fixierten, elektrisch betriebenen Heizschlange ermöglicht die dreiseitige Einfassung eines Versuchskörpers (siehe Abb. 2). Ein integrierter Polystyrol-Dämmstreifen verhindert dabei einen Wärmestau im unmittelbaren Verbundbereich und schützt so den Epoxidharzklebstoff vor lokaler Überhitzung.

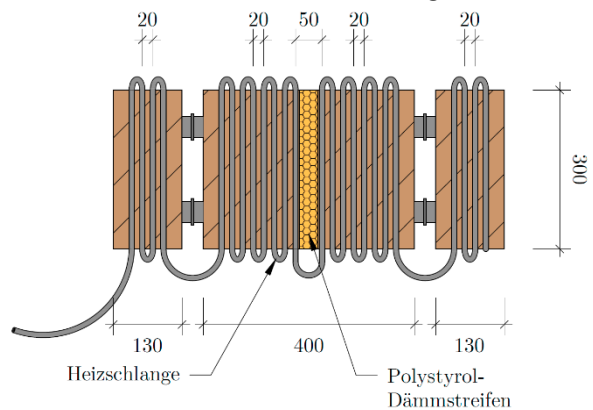


Abb. 2: Darstellung der entwickelten Heizvorrichtung

Über eine Induktionsdauer von circa 100 Minuten wird eine Zieltemperatur von  $45\text{ °C}$  im oberflächennahen Bereich des Betons angestrebt. Eine Regelungseinheit begrenzt dabei den Temperaturbereich der Heizvorrichtung auf 50 bis  $55\text{ °C}$ , um ein Überschreiten der Glasübergangstemperatur ( $T_g = 58\text{ °C}$ ) des Epoxidharzklebstoffs sicher auszuschließen.

## Innovatives Versuchskonzept

Gängige experimentelle Verbunduntersuchungen an Kleinkörpern nutzen oft eine vollflächige Einspannung der Probekörper, was zu einer ungewollten Spannungsüberlagerung im Bereich der verklebten CFK-Lamelle führt. Dadurch wird die reale Beanspruchungssituation im Bauwerk nur eingeschränkt wiedergegeben. Um eine höhere Relevanz für die Ingenieurpraxis zu erzielen, wurde ein modifiziertes Konzept für direkte Ausziehversuche unter Druck-Zug-Umgebung entwickelt.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Das Kernstück des Aufbaus bildet eine auskragende Stahl-Auflagerkonstruktion (siehe Abb. 3). Diese ermöglicht eine zentrische Krafteinleitung und entkoppelt die Auflagerkräfte gezielt vom unmittelbaren Schlitzbereich. Durch einen konstruktiven Abstand von 80 mm zwischen Lasteinleitung und Lamelle wird eine ungestörte Ausbildung der Verbundmechanismen sichergestellt, was die Basis für eine realitätsnahe Beurteilung des Verbundtragverhaltens bildet.

Die Belastung erfolgt weggesteuert über einen hydraulischen Prüfzylinder. Die Kraft wird dabei mittels einer speziellen Keilankerung in die CFK-Lamelle eingeleitet. Diese stellt eine gleichmäßige Querdruckbelastung der empfindlichen Lamelle sicher und verhindert so vorzeitige Verankerungsbrüche. Um eine Versuchsdauer von etwa 20 Minuten zu realisieren, wird eine quasi-statische Belastungsrate von  $v_1 = 0,01 \text{ mm/s}$  gewählt.

### Sensorik und Untersuchungsparameter

Zur präzisen Analyse wird die Dehnungsverteilung der verklebten CFK-Lamellen mittels faseroptischer Sensorik hochauflösend erfasst, was tiefere Einblicke in das Verbundtragverhalten unter den betrachteten Randbedingungen ermöglicht. Dabei wird neben der Temperaturbelastung erstmalig der Einfluss variierender Schlitzbreiten innerhalb der nach DAfStb-

Richtlinie [4] zulässigen Grenzen isoliert untersucht. In Abhängigkeit der Lamellendicke  $t_L$  liegen die zulässigen Grenzwerte für die Schlitzbreite bei  $t_L + 1 \text{ mm}$  (untere Grenze) und  $t_L + 3 \text{ mm}$  (obere Grenze).

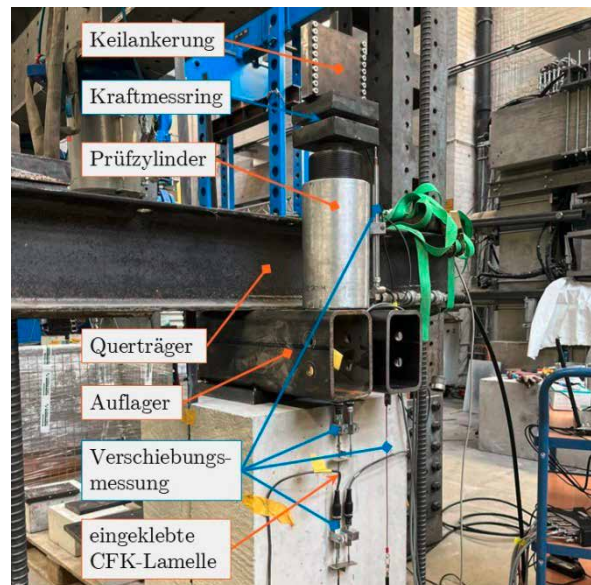


Abb. 3: Ansicht des Versuchsaufbaus

## V Versuchsergebnisse

Die Auswertung der experimentellen Daten liefert sowohl grundlegende Erkenntnisse zum Einfluss der Schlitzgeometrie als auch zum Verbundtragverhalten unter brückenspezifischen Randbedingungen.

### Einfluss der Schlitzbreite

Die Untersuchungen bei Raumtemperatur bestätigen, dass die Schlitzbreite einen messbaren Einfluss auf das Verbundtragverhalten hat. Innerhalb der nach DAfStb-Richtlinie [4] zulässigen Grenzen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- **Tragfähigkeit:** Schmalere Schlitzte führen zu einer Reduktion der Versagenslast um ca. 6,5 % (schmale Lamellen) bis 13,1 % (breite Lamellen).
- **Verbundsteifigkeit:** Systeme in schmalen Schlitzten reagieren deutlich steifer und weisen dabei eine geringere Verformungsfähigkeit auf.

- **Lastabtragung:** Die Ausbildung eines ausgeprägten Verbundspannungsmaximums wird in engen Schlitzen gehemmt, was die Effektivität der Kraftübertragung mindert.
- **Sicherheitsniveau:** Trotz der festgestellten Einbußen liegen alle gemessenen Traglasten über den nach DAfStb-Richtlinie [4] berechneten Werten der Tragfähigkeit zur Bemessung des Verbundsystems.

Die Ergebnisse validieren die Sicherheit innerhalb der normativen Grenzen bei Umgebungstemperatur und dienen als Referenz für die Bewertung der thermischen Einflüsse.

#### Einfluss erhöhter Temperatur

Die experimentellen Untersuchungen unter einer extremalen thermischen Belastung von ca. +45 °C verdeutlichen die hohe Temperatursensitivität des Verbundsystems:

- **Tragfähigkeit:** Im Vergleich zur Referenzserie wurde eine signifikante Reduktion der Versagenslast, im Mittel zwischen 19,6 % und 22,0 %, festgestellt.
- **Materialdegradation:** Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Adhäsionsfestigkeit des Epoxidharzklebstoffs an der Grenzfläche zum Beton sowie eine verringerte Kohäsionsfestigkeit innerhalb der Klebstoffschicht.
- **Verbundsteifigkeit:** Infolge der thermischen Belastung sinkt die Steifigkeit deutlich, was zu größeren Verformungen des Verbundsystems führt. Die Epoxidharzmatrix geht unmittelbar in einen Zustand plastischer Verformung über.
- **Geometrie-Interaktion:** Durch die gesteigerte Nachgiebigkeit des Klebstoffs nähert sich das Tragverhalten unterschiedlicher Schlitzbreiten einander an, wodurch die ursprünglich steifere Charakteristik schmaler Schlitze relativiert wird.

- **Lastabtragung:** Die detaillierte Analyse (faseroptische Sensorik) bestätigt eine veränderte Spannungsverteilung mit frühzeitiger Aktivierung des gesamten Verbundbereichs sowie ein signifikant früheres Einsetzen des Schlupfs am lastfernen Verbundende.
- **Sicherheitsniveau:** Trotz der ausgeprägten Festigkeitsverluste wird die charakteristische Tragfähigkeit gemäß DAfStb-Richtlinie [4] unter Ansatz der vorgesehenen Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung von Langzeit- und Umwelteinflüssen weiterhin sicher eingehalten.

#### **Fazit und Ausblick**

Die experimentellen Untersuchungen belegen das hohe Potenzial von NSM CFK-Lamellen zur Nutzungszeitverlängerung von Massivbrücken. Durch das modifizierte Versuchskonzept wurde eine fundierte Referenzdatenbasis geschaffen, die den Einfluss variierender Schlitzbreiten isoliert berücksichtigt. Trotz festgestellter Traglastreduktionen bei einer extremalen Prüftemperatur von +45 °C deuten die Versuchsergebnisse darüber hinaus auf eine sichere Anwendbarkeit des Verstärkungssystems im Massivbrückenbau hin.

Aufbauend auf dem entwickelten Versuchskonzept ermöglichen künftige Untersuchungen eine vertiefte Analyse thermischer und dynamischer Einflüsse auf das Verbundtragverhalten. Die bereits geschaffene Datenbasis ebnet dabei den Weg für eine zügige Überführung des Verstärkungsverfahrens in die Baupraxis. Durch diese zeitnahe Anwendungsreife steht der Bauwirtschaft eine leistungsfähige und ökonomische Lösung zur Ertüchtigung der Brückeninfrastruktur zur Verfügung, deren Wirksamkeit in einem nächsten Schritt durch großmaßstäbliche Bauteilversuche final bestätigt werden soll.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: O. Fischer, T. Lechner, M. Wild, A. Müller und K. Kessner, „Nachrechnung von Betonbrücken - systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke“, in *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 124*, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg., Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2016, ISBN: 9783956062247.
- [2]: Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1991-1-5: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen*, 2010.
- [3]: U. Lichte, „Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken“, Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2004.
- [4]: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, *Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung* (DAfStb-Richtlinie), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen (zusätzlich zu den oben aufgeführten):

1. W. Finckh, *Verstärken von Betonbauteilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024, ISBN: 978-3-658-45856-0. DOI: 10.1007/978-3-658-45857-7.
2. M. A. Blaschko, „Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2001.

## Autor

### Manuel Bauer, M.Sc.

#### Studium

|                   |                                                                 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 10/2022 – 12/2025 | Masterstudium Bauingenieurwesen (M.Sc.), TUM, München           |
| 09/2024 – 01/2025 | Auslandsstudium – Structural Engineering (M.Sc.), BME, Budapest |
| 10/2018 – 09/2022 | Bachelorstudium Bauingenieurwesen (B.Sc.), KIT, Karlsruhe       |

#### Berufserfahrung

|                   |                                                                                   |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| seit 02/2026      | Bauingenieur, SSF Ingenieure AG, Stahl- und Großbrücken, München                  |
| 01/2024 – 10/2025 | Werkstudent, Sweco GmbH, München                                                  |
| 02/2023 – 12/2023 | Wissenschaftliche Hilfskraft, Holzbau & Brandschutz, TUM, München                 |
| 01/2020 – 08/2022 | Wissenschaftliche Hilfskraft, Baustoffforschung & Bauwerksprüfung, KIT, Karlsruhe |

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. Betreut wurde die Arbeit durch Leopold Staller, M.Sc., unter der Lehrstuhlleitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# FEUCHTEVERHALTEN VON HOLZ-BETON-VERBUND-DECKEN AUS BRETTSPERRHOLZ MIT KERVEN UND UNTERSCHIEDLICHEN OBERFLÄCHENBEHANDLUNGEN

## Masterarbeit

*Tanja Böhm*

Die vorliegende Arbeit untersucht das Feuchteverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken (HBV-Decken) aus Brettsperrholz (BSP) mit Kerven unter verschiedenen Oberflächenbehandlungen. Ziel ist die Messung der Holzfeuchte in kleinformatischen, praxisnahen Prüfkörpern, insbesondere im Vorholzbereich der Schubkerve. Über einen Zeitraum von 28 Tagen werden mittels elektrischer Widerstandsmessung die Holzfeuchten in der obersten Lamelle erfasst und analysiert, inwiefern unterschiedliche Oberflächenbehandlungen den Feuchteeintrag durch Frischbeton beeinflussen. Die anisotrope Struktur sowie chemisch-physikalische Wechselwirkungen führen zu einem komplexen Feuchtetransport innerhalb des kapillarporösen Systems. Erhöhte Holzfeuchten können die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Konstruktion beeinträchtigen. Unbehandelte Prüfkörper zeigten erhöhte, jedoch unkritische Feuchten; eine vollständige Versiegelung minimierte den Feuchteeintrag, während partielle Abdichtungen zu lokal erhöhten Feuchten unter der Schubkerve führten. Kritisch ist insbesondere die Kombination aus fehlendem Bewitterungsschutz und Feuchteeintrag aus Frischbeton.

**Keywords:** Holz-Beton-Verbunddecken, Kerven, Holzfeuchte, Oberflächenbehandlungen, Brettsperrholz, Frischbeton

## Einleitung

HBV-Decken kombinieren die Vorteile von Holz und Beton: Holz kompensiert die geringe Zugfestigkeit des Betons, während Beton Schwingungsverhalten und Schalldämmung verbessert. Eine effektive Schubverbindung, beispielsweise durch ausbetonierte Kerven, ist entscheidend für das Systemtragverhalten.

Die Schubkraftübertragung hängt stark von der konstruktiven Ausbildung und den Materialeigenschaften ab. Holz ist kapillarporös und feuchteabhängig: Das Anmachwasser des Frischbetons kann im Hirnholz Feuchten von über 20 M.-% erzeugen, die Kervensteifigkeit reduzieren und die biologische Dauerhaftigkeit gefährden. Literaturangaben zeigen, dass Frischbeton zu erhöhtem Feuchteeintrag in der

Kontaktfuge führt, besonders im Bereich der Kerven [1–3]. Zudem sind die Wechselwirkungen zwischen Zement und Holz, Witterungseinflüsse und baupraktische Einflüsse auf die Holzfeuchte und das Tragverhalten zu berücksichtigen.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Ausmaß des Feuchteintrags durch Frischbeton sowie die räumliche und zeitliche Verteilung im Brettsperrholz mit Kerven experimentell über einen Zeitraum von 28 Tagen zu untersuchen und die Wirkung unterschiedlicher Oberflächenbehandlungen zu bewerten. Realitätsnahe Prüfkörper dienen dazu, die Holzfeuchteentwicklung über 28 Tage sowie die Auswirkungen erhöhter Holzfeuchten auf Kervensteifigkeit, Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu erfassen.

## Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen fokussieren sich auf die Holzfeuchte in der obersten, 4 cm dicken Lamelle des BSP-Elements, parallel zur Spannrichtung verlaufend. Verwendet wurde ein Normalbeton C25/30 mit w/z-Werten von 0,53 bis 0,55, eine Aufbetonhöhe von 10 cm sowie eine 20 mm tiefe und 150 mm lange Kerbe (Mindestabmessungen gemäß DIN CEN/TS 19103 [4]), vgl. Abb. 1.

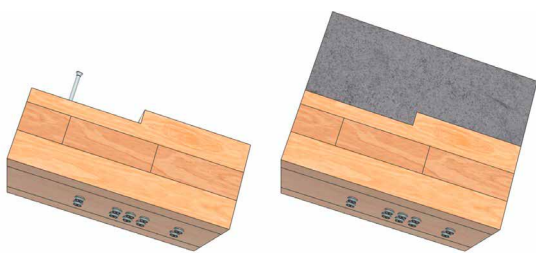


Abb. 1: Schematischer Prüfkörperaufbau mit Messstellen

Die Variation erfolgte über die sechs unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen der Prüfkörperkonfigurationen (a1 bis f), die beispielsweise diffusionsfähige Membrane, vorherigen Feuchteintrag, Zementschlämme oder spritzfähige Dispersion umfassten. Die Feuchtemessungen wurden mittels elektrischen Widerstandsmessverfahren durchgeführt. Ergänzend erfolgten partielle Nachuntersuchungen zur Beurteilung

längerfristiger Holzfeuchteverläufe sowie Untersuchungen zum Einfluss der Betonalkalität auf die Dauerhaftigkeit.

## Messergebnisse und Vergleich

Abbildung 2 zeigt die Positionierung der Messstellen, die der Auswertung zugrunde liegt.

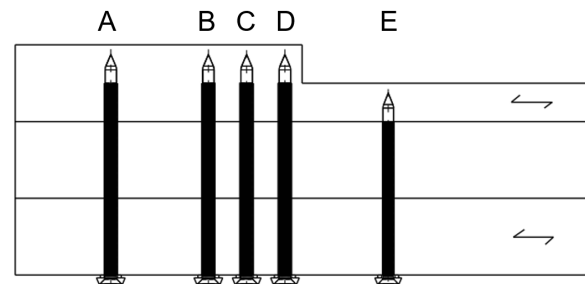


Abb. 2: Messstellenbelegung im BSP-Querschnitt

Der Feuchteintrag erfolgt primär über das Anmachwasser des Betons. Für eine vollständige Hydratation wird ein w/z-Wert von 0,4 benötigt – dieser Anteil wird chemisch und physikalisch gebunden [5]. Das Überschusswasser (rund 300 ml je Prüfkörper) wurde über Kapillarporenbildung, Betondiffusion oder durch Aufnahme durch das BSP abgeführt. Eine quantitative Erfassung der aufgenommenen Wassermenge war nicht möglich. Die Betonoberfläche in der Fuge zwischen BSP und Beton zeigte keine Anzeichen einer durch Holzinhaltsstoffe verursachten Verzögerung oder Verhinderung der Zementhydratation – wie Versandung – auch nicht im Kervenbereich, vgl. Abb. 3.



Abb. 3: Betonoberfläche Kerbe, nass

Die Ausgangsholzfeuchten aller Prüfkörper lagen vergleichbar zwischen 10 – 12 M.-%, außer bei Prüfkörper d (Klimakammer). Kurz nach der Betonage traten bei fast allen Konfigurationen, mit Ausnahme des vollständig abgedichteten Prüfkörpers f (Membran und Dispersion) kurzzeitige Feuchtespitzen über der Fasersättigung

auf. Nach 28 Tagen lagen die Holzfeuchten größtenteils unterhalb des Fasersättigungspunkts ( $\sim 30$  M.-%). Der Grenzwert nach DIN 68800 [6] von 20 M.-% wurde überwiegend nur an Messstelle D (vgl. Abb. 2 und Abb. 4) überschritten.

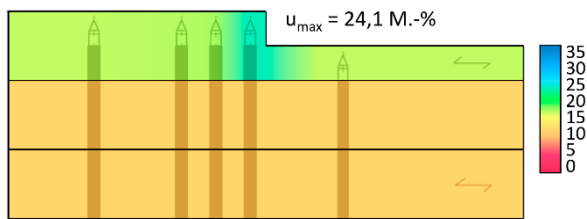


Abb. 4: Holzfeuchte  $u$  in M.-%, Zeitpunkt  $t = 28$  Tage; a2

Die unbehandelten Prüfkörper (a1 und a2) zeigten keine Auffälligkeiten im Kervenbereich. Die partielle Abdichtung bei b (Membran) reduzierte die Feuchtezunahme außerhalb der Kerve, wirkte sich jedoch nachteilig unter der Schubkerve aus. Konfigurationen c (simuliertes Regenereignis), d sowie f zeigten abweichende Feuchteverhalten. f erwies sich als die effektivste Behandlung – alle Messstellen lagen unter 20 M.-% über den gesamten Zeitraum. Der Prüfkörper e (Zement-schlämme) zeigte keine signifikante Wirkung. Ab etwa 100 mm von der Stirnfläche der Kerve war keine signifikante Zufuhr über die Faserlängsrichtung messbar – ab hier erfolgte der Feuchte-eintrag ausschließlich quer zur Faser.

In Messstelle A (vgl. Abb. 2) stellte sich mit Ausnahme von b und f ein Plateau bei rund 17 – 18 M.-% ein. Ähnlich wie in E – Betrachtung des Feuchteeintrags quer zur Faser – näherten sich fast alle Prüfkörper asymptotisch diesem Wert an. E0 (unter Kerve, ohne Aufbeton) trocknete rasch auf die Ausgangsfeuchte ab. D zeigte  $u_{28d} \approx 25$  M.-% bei unbehandelten Prüfkörpern.

## Diskussion

Höhere Feuchteänderungen, wie sie in [1] und [3] beobachtet wurden, traten nicht auf, da diese vermutlich auf den dort eingesetzten Brettstapel mit zusätzlichem Feuchtetransport über die Lamellenfugen zurückzuführen sind.

Der Feuchtetransport im Holz erfolgt zunächst über kapillares Saugen und freie Wassereinlagerung, insbesondere über große Kapillaren im Zelllumen, gefolgt von Diffusionsprozessen unterhalb der Fasersättigung [7]. Die zeitlich begrenzten Feuchtemaxima – insbesondere in Messstelle D – traten innerhalb weniger Stunden nach der Betonage kurz vor dem Erstarrungsende (5 bis 6 h nach Betonage) auf. Somit bildet Messstelle D einen der beiden beobachteten typischen Kurvenverläufe ab.

Quer zur Faser hingegen erfolgte die Aufnahme über die kleinen Kapillaröffnungen der Hoftüpfel [7], was durch den zweiten charakteristischen Holzfeuchteverlauf an den Messstellen A, B und E bestätigt wurde. Dabei dominierten langsame, vom geringen Feuchtegradienten angetriebene Diffusionsprozesse [7].

Die partielle Oberflächenabdichtung mittels Trennfolie außerhalb der Kerve reduzierte die Feuchteaufnahme in den vom Hirnholz unbeeinflussten Bereichen und führte zu einer Konzentration des Feuchteintrags im Bereich der unversiegelten Schubkerve – insbesondere unterhalb der Kerve (Messstelle E). Die globale mittlere Holzfeuchte der oberen Lamelle blieb unverändert. Die erhöhten Holzfeuchten wurden als unkritisch bewertet, da dieser Bereich für die Kervensteifigkeit weniger relevant ist und die Holzfeuchten dennoch unterhalb der Grenzwerte lagen. Die vollständige Oberflächenabdichtung verhinderte den Feuchteeintrag nahezu vollständig.

Ein vorheriger Feuchteeintrag beeinflusste den globalen Feuchteeintrag deutlich. Eine gleichmäßig erhöhte Ausgangsholzfeuchte reduzierte vermutlich den Kapillarsog und damit die Wasseraufnahme aus dem Frischbeton, während lokal konzentrierte Befeuchtung (c), unmittelbar vor Betonage – insbesondere im Kervenbereich – zur Erhöhung der relativen Holzfeuchte führte. Das Vornässen, etwa 2 Tage vor Aufbringen des Frischbetons, erscheint in den von der Faserlängsrichtung unbeeinflussten Bereichen theoretisch günstig, ist praktisch jedoch kaum umsetzbar.

Kritische Holzfeuchten für Pilzwachstum lagen nach 28 Tagen ausschließlich lokal in den ersten 3 cm im Vorholz vor. Aufgrund der dort gemessenen pH-Werte von 10,3 bis 7,4 und der nur am unteren Grenzwert für Pilzwachstum auftretenden Holzfeuchten wird das Risiko holzzerstörender Pilze als gering eingeschätzt [8].

Bezüglich der Bemessung in den Grenzzuständen wird – unter Annahme vergleichbarer Bedingungen wie bei Push-Out-Versuchen (vor allem Holzfeuchten) – vermutet, dass ohne vorherigen Feuchteeintrag keine signifikante Beeinträchtigung der Kervensteifigkeit zu erwarten ist. Es liegen keine konkreten Angaben zu Feuchtwerten zum Zeitpunkt der Versuche vor.

Abschließend ist zu beachten, dass das auf der elektrolytischen Leitfähigkeit basierende Widerstandsmessverfahren aufgrund der veränderten Ionenkonzentration durch den Frischbeton beeinflusst werden könnte.

## Fazit

Es wurde das Feuchteverhalten von BSP-Beton-Verbunddecken mit Kerven in der oberen Lamelle über 28 Tage untersucht. Unbehandelte und gängig oberflächenbehandelte Prüfkörper wurden betrachtet, ergänzt durch Nachuntersuchungen mit linearer Interpolation zur Einschätzung des Langzeitverlaufs. Der pH-Wert in Bereichen über dem Grenzwert ( $> 20 \text{ M.-%}$ ) wurde bestimmt, um das Risiko holzzerstörender Pilze zu bewerten.

Die Messungen zeigen, dass die Wasseraufnahme über das Hirnholz rasch über Kapillaren erfolgte, während der querfaserige Transport deutlich langsamer war und nach ca. acht Tagen ein Plateau bei  $17 - 18 \text{ M.-%}$  erreichte. Diffusion durch den Querschnitt war träge und wurde vermutlich durch den hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand von PUR verstärkt. Kritische Feuchten traten nur bei zusätzlichem Feuchteeintrag auf; unbehandelte Decken ohne zusätzlichen Feuchteeintrag

zeigten keine Hinweise auf Tragfähigkeits- oder Gebrauchstauglichkeitsminderung. Lokale Überschreitungen des Grenzwerts von  $20 \text{ M.-%}$  stellten aufgrund des hohen pH-Werts kein Pilzrisiko dar.

Die Wirksamkeit der Oberflächenbehandlungen zeigte: Zementschlämme beeinflusste die Feuchte kaum, vollständige Abdichtung mittels Dispersion und Trennfolie war effektiv, partielle Versiegelung verlagert Feuchte in unkritische Bereiche. Vornässen der Flächen zwei Tage vor Betonage reduziert die Wasseraufnahme und begünstigt die Hydratation, ist jedoch praktisch schwer umsetzbar. Für die Baupraxis lässt sich ableiten, dass Kervenflanken lokal mit Dispersion abgedichtet und horizontale Flächen unbehandelt oder mit Trennfolie versehen werden sollten.

## Ausblick

Künftige Untersuchungen sollten die feuchteabhängige Kervensteifigkeit sowie die vollständig abgedichtete Konfiguration  $f$  berücksichtigen. Ergänzend wären Untersuchungen zum Feuchteeintrag während der Bauphase – etwa infolge erhöhte Ausgangsholzfeuchten, Starkregenereignissen oder Feuchteeintrag über den Festbeton – sinnvoll.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schänzlin, J.: Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken Ausgabe 2003.
- [2]: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: Beton-Kalender 2013. Wiley, 2012.
- [3]: Braun, H.-J.; Schaal, W.; Schneck, F.: Der Brettstapel als Verbundelement - Vorschlag für einen Berechnungsansatz. In: Bautechnik 75 (1998), Heft 8, S. 539-547.  
<https://doi.org/10.1002/bate.199804100>
- [4]: DIN CEN/TS 19103:2022-02: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Vornorm, Ausgabe Februar 2022
- [5]: Neroth, G.; Vollenschaar, D.: Holz und Holzwerkstoffe. In: Neroth, G.; Vollenschaar, D. (Hrsg.): Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011, S. 813-897.
- [6]: DIN 68800-1: Holzschutz. Norm, Ausgabe Juni 2019.
- [7]: Niemz, P.; Sonderegger, W.U.: Holzphysik – Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte. Hanser, München, 2021
- [8]: Huckfeldt, T.; Schmidt, O.: Hausfäule- und Bauholzpilze – Diagnose und Sanierung; mit 150 Tabellen, Bauen im Bestand, Müller, Köln, 2015.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Literaturquelle 4
2. Literaturquelle 5
3. Literaturquelle 6

## Autor

Kurzlebenslauf – M. Eng. Tanja Böhm

### **Master of Engineering Bauingenieurwesen**

OTH Regensburg (03/2024 – 01/2026), Schwerpunkt: Bauen im Bestand

### **Bachelor of Engineering Bauingenieurwesen**

OTH Regensburg (10/2020 – 02/2024)

### **Praxis & Werkstudententätigkeiten**

Werkstudententätigkeit in der Tragwerksplanung: ZM-I Regensburg GmbH (09/2023 – 01/2026)

Werkstudententätigkeit in der Bauleitung: Eiffage Infra Süd GmbH (02/2025 – 01/2026)

Praxissemester: Ingenieurbüro Fritsche & Partner mbB (08/2022 – 12/2022)

Technische Produktdesignerin: ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG (08/2017 – 08/2018)

### **Ausbildung als Technische Produktdesignerin (Fachrichtung: Maschinen- und Anlagenkonstruktion)**

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG (09/2014 – 07/2017)

## Betreuer

Die Arbeit wurde an der OTH Regensburg Fakultät Bauingenieurwesen im Fachbereich Holzbau angefertigt und von Herrn Professor Dipl.-Ing. Florian Scharmacher betreut.

**Die Arbeit wird mit dem 1. Preis ausgezeichnet.**

# KONZEPTION UND PLANUNG EINES GEBÄUDES MIT NICHTMETALLISCHER BEWEHRUNG

## Masterarbeit

*Felix Bohndorf*

Carbonbeton ist die materialsparende Massivbauweise der Zukunft. Mit dem Einsatz nichtmetallischer Bewehrung wird der Betonverbrauch gegenüber konventioneller Stahlbetonbauweise signifikant reduziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde weltweit das erste Carbonbeton Gebäude der Energie Infrastruktur mit strukturierten Querschnitten konstruiert und bemessen. Die Konzeption und statisch-konstruktive Nachweisführung des Transformatorengebäudes zeigt das Potential des Carbonbetons als innovative Strategie einer ressourcenschonenden nachhaltigen Bauweise zur Reduktion des Betonvolumens durch aufgelöste Querschnitte und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Planung des Tragwerks erfolgt unter engem Austausch mit dem Industriepartner EUDUR als Fertigteilkonstruktion. Neben der Biegebemessung, bestand die Herausforderung in der Querkraftbemessung, der Nachweisführung der rippenartigen Wandquerschnitte nach Theorie II. Ordnung sowie der Aussteifung mitsamt der zugehörigen Verbindungsmittel zum kraftschlüssigen Verbund der Fertigteile. Das Ergebnis ist eine Betonvolumenreduktion von 41 % gegenüber konventionellen Stahlbetonkonstruktionen. Der im Herbst 2025 fertiggestellte Prototyp „EcoCube“ belegt das erhebliche Potenzial der nichtmetallischen Bewehrung für eine nachhaltige, ressourcenschonende Bauweise.

**Keywords:** Nichtmetallische Bewehrung, Carbonbeton, Ressourceneffiziente Tragwerke, Nachhaltige Baukonstruktion, Betonvolumenreduktion, Dehnungsbasierte Bemessung

## Einleitung

Die Zement- und Betonherstellung ist ein wesentlicher CO<sub>2</sub>-Emittent und trägt weltweit maßgeblich zum Treibhauseffekt bei. Allein der Gebäudesektor verantwortet hierbei 47 % der

globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen [1]. Materialeffiziente Tragwerkslösungen gewinnen daher zunehmend an Bedeutung, insbesondere in Bereichen wie der Energieinfrastruktur, in denen langlebige und robuste Bauwerke erforderlich sind. Beton mit nichtmetallischer Bewehrung eröffnet hier neue konstruktive und ökologische Potenziale.

Aufgrund der hohen Zugfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der nichtmetallischen Bewehrung können Bauteilquerschnitte signifikant reduziert werden, ohne dabei die Tragfähigkeit zu beeinträchtigen. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion des Betonvolumens und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Das Transformatorengebäude wird unter Berücksichtigung der standortspezifischen Einwirkungen für München geplant. Dach und Wände werden als Fertigteile mit einer aufgelösten, rippenartigen Struktur ausgeführt, um die Lastabtragung effizient zu gestalten. In der Nachweisführung und Ausbildung der konstruktiven Details werden die spezifischen Anforderungen der Energieinfrastruktur (wie Störlichtbogensicherheit) besonders berücksichtigt.

## Tragwerkskonzept

Das Transformatorengebäude „EcoCube“ besitzt eine Grundfläche von 3 × 4 m und eine Höhe von 2,5 m (Abb. 1).



Abb. 1: Prototyp des gebauten Transformatorengebäudes „EcoCube“ (Bildquelle: Firma EUDUR)

Ziel des Tragwerkskonzepts ist die Reduktion des Betonquerschnitts auf ein Minimum bei gleichzeitiger Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit auch unter außergewöhnlichen Einwirkungen (Störlichtbogen in der Mittelspannungsanlage), resultierend aus dem Betrieb des im Inneren befindlichen Transformators. Ein effizientes

Tragwerk wird durch einen gezielten Tragwerksentwurf, unter genauer Kenntnis der einwirkenden Lasten und dem Verständnis über den Lastabtrag der Bauteile realisiert. Aus diesem Grund wurde für das Dach ein Plattenbalken und für die Wände ein strukturierter Querschnitt gewählt.

Das Dach wird als Satteldach mit einer Neigung von 3 % ausgeführt, wobei die Neigung über die variable Bauteilhöhe (Gesamtquerschnitt 10 bis 14,5 cm) der Plattenbalken sichergestellt wird. Die Abtragung der Biegemoment- und Querkraftbeanspruchungen aus ständiger Last (Eigengewicht) und veränderlicher Last (Schnee, Wind) erfolgt zunächst über die Plattenanteile des Daches (Plattenquerschnitt 4 cm). Durch die Anpassung der Bauteilhöhe an den Momentenverlauf wird die Ausnutzung des Materials weiter optimiert. Die Lasten aus dem Plattenbalken des Daches werden über dessen Randbalken gezielt in die strukturierten Wände eingeleitet (Abb. 2). Im Unterschied zum Dachtragwerk übernehmen die Wandrippen hier auch den vertikalen Lastabtrag (vereinfachtes statisches System: Stütze), wohingegen die Plattenanteile analog zum Dach (Plattenquerschnitt) primär der Aufnahme der horizontalen Windeinwirkung dienen.



Abb. 2: Transformatorengebäude mit Plattenbalkenquerschnitt (Bildquelle: Firma EUDUR)

## Grundlagen der Bemessung

Bei nichtmetallischer Bewehrung handelt es sich um einen Faserverbundkunststoff (FVK). Diese

Kompositwerkstoffe bestehen aus Faser (gebündelt zu einem Filament, mehrere Filamente zu einem Roving) und einer Tränkung (Matrix). Herstellerspezifisch kommen für die stabförmigen oder flächigen Bewehrungen verschiedene Tränkungen zum Einsatz, wodurch unterschiedliche Materialeigenschaften entstehen. Für diese Bauprodukte bestehen bislang weder technische Baubestimmungen noch allgemein anerkannte Regeln der Technik, sodass ihre Anwendung nur über eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder einer vorhabenbezogenen Baugenehmigung (vBG) projektspezifisch erfolgen kann.

Inhalt aktueller Forschungsfragen ist die Erarbeitung einer normativen Regelung und standardisierter Verfahren, wie die Erstellung von Bemessungstabellen mit dimensionslosen Beiwerten [2]. Die durchgeführten Handrechnungen orientieren sich an der DAfStb Richtlinie für nichtmetallische Bewehrung [3] und der DIN EN 1992-1-1 [4] in Kombination mit dem Nationalen Anhang für Deutschland DIN EN 1992-1-1/NA [5].

Für die Ermittlung der nichtmetallischen Bewehrung nach Theorie I. Ordnung erfolgt die Bemessung analog zu den Grundlagen des Stahlbetonbaus. Im Fall der Biegebemessung wird bei der iterativen Berechnung des Kräftegleichgewichts mittels eigener Berechnungstools die Bemessungsdehnung der Bewehrung maximal angesetzt, um ein Bewehrungsversagen und somit duktiles Bauteilversagen zu erreichen. Bei der Querkraftbemessung wird die Verträglichkeit der Dehnungen von Längs- und Querkraftbewehrung nachgewiesen. Stabilitätsgefährdete Bauteile wie die Rippen (Stützen) in den strukturierten Wänden erfahren infolge der filigranen Querschnitte unter Druckbeanspruchung bereits bei geringer Verformung eine zusätzliche Lastausmitte und eine signifikante Veränderung der Bemessungsschnittgrößen. Es ist daher auch eine Bemessung nach Theorie II. Ordnung erforderlich. Für Normalkraft beanspruchte Bauteile erfolgt nach

DIN EN 1992-1-1 [4] der Nachweis nach Theorie II. Ordnung. Für nichtmetallische Bewehrung ist der Nachweis nach Theorie II. Ordnung noch nicht vollumfänglich in den Richtlinien enthalten. Nach der DAfStb-Richtlinie [3] erfolgt die Bemessung der Stützen auf Basis der Kompositmethode. Dabei wird die Tragfähigkeit eines Querschnittes für Biegung mit oder ohne Längskraft durch Versuche ermittelt, auf deren Basis ein Interaktionsdiagramm erstellt wird. Der Nachweis ist erfüllt, wenn die einwirkenden Schnittgrößen innerhalb der Grenzkurve im zulässigen Bereich des Interaktionsdiagramms liegen. Eine weitere Vereinfachung bietet die Normierung des Interaktionsdiagramms, durch die Bestimmung der Ausnutzungsgrade des Querschnittes. Um im Rahmen dieser Arbeit ohne vorherige Bauteilversuche dennoch einen Ausblick der Tragfähigkeit der Stützen zu geben werden die reine Druckkraft, die reine Zugkraft und das reine Biegemoment bestimmt und in einem vereinfachten normierten Interaktionsdiagramm dargestellt. Die Anwendung der Kompositmethode ist ausschließlich in Verbindung mit einem Bauteilversuch zulässig. Durch die erfolgreiche Durchführung dieser Versuche kann die erforderliche ZiE oder eine vBG erlangt werden.

Die Plattenanteile der Wände sowie die vertikalen Randträger wurden für die Aussteifungsberechnung des Gebäudes herangezogen. Abb. 3 zeigt die Bewehrung (Carbongitter:  $f_{nm,k} = 1200 \text{ N/mm}^2$ ; Carbonstab  $\varnothing 6$ :  $f_{nm,k} = 2100 \text{ N/mm}^2$ ) der Wandplatte und der Wandrippen während der Betonage (Beton C40/50;  $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ).



Abb. 3: Wandquerschnitt während der Betonage (Bildquelle: Firma EUDUR)

Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion wurden sämtliche Verbindungsmittel in nichtrostendem Stahl (Edelstahl) ausgeführt und nachgewiesen. Diese erfordern jedoch größere Bauteildicken als für den Lastabtrag im Tragwerk nötig sind.

## Ergebnisse

In der statischen Berechnung wurden alle Bauteile in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen. Die Plattenbalken des Dachtragwerks tragen Biegemomente und Querkraft zuverlässig, auch unter den außergewöhnlichen Lasten durch Störlichtbögen in der Mittelspannungsanlage, ab. Abb. 4 zeigt den Plattenbalken des Dachtragwerks auf Höhe des Randträgers und in Feldmitte.

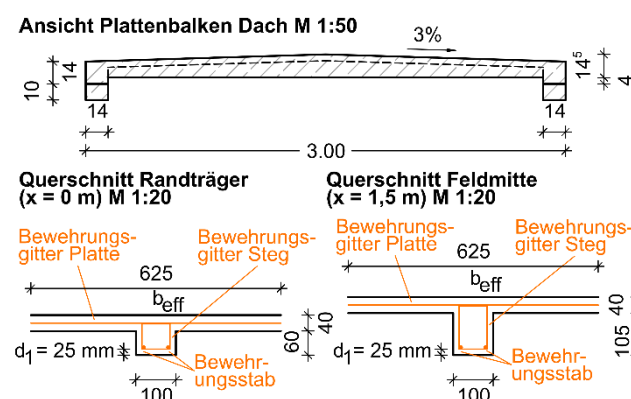


Abb. 4: Plattenbalken des Dachtragwerks mit Bewehrungsführung (schematisch)

Die Stützen der strukturierten Wände sind ausreichend dimensioniert, um Normalkräfte aus Dach- und Eigenlasten abzutragen, wobei die Plattenanteile der Wände gleichzeitig die Aussteifung des Gebäudes sicherstellen.

Für die Quantifizierung der Materialeinsparung wurden die bestehenden konventionellen Stahlbetongebäude für Transformatoren des Industriepartners EUDUR herangezogen, mit einer Vollwandstärke von 10 cm. Auf Basis dieser Betonvolumina konnte die Reduktion des Betonvolumens durch Carbonbeton mit aufgelösten reduzierten Querschnitten berechnet werden. Das Ergebnis zeigt eine Reduktion des

Betonvolumens von 41 % und damit des Gewichts.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Bemessung der strukturierten Carbonbeton Bauteile des „EcoCube“ erfolgte in dieser Arbeit in weiten Teilen über Handrechenverfahren. Die Grundlagen der Bemessungen bildet derzeit die DAfStb-Richtlinie [3] für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung zusammen mit den aktuellen Eurocodes [4, 5]. Eine Nachweisführung mit allgemeingültigen Bemessungshilfen (wie aus dem Stahlbeton bekannt), ist für Carbonbeton in vielen Fällen noch nicht verfügbar, somit war die Nachweisführung sehr herausfordernd. Die Basis für die Biegebemessung bildet die aus dem Stahlbetonbau bekannte Iteration der Dehnungen über das innere Kräftegleichgewicht. In der Stützenbemessung für nichtmetallische Bewehrung liegt die Besonderheit in der Momenten-Normalkraft-Interaktion.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Einsatz von gewichtsoptimierten Plattenbalkenquerschnitten ohne Einschränkungen in Bezug auf die Tragfähigkeit realisierbar ist. Durch die Carbonbetonbauweise kann im Vergleich zur konventionellen Stahlbetonbauweise eine Reduktion des Betonvolumens von 41 % erzielt werden. Die Planung und Bemessung von Tragwerken mit nichtmetallischer Bewehrung ist technisch umsetzbar und bietet zugleich deutliche Vorteile hinsichtlich der Material- und Volumeneffizienz. Mit dieser Bauweise wird folglich ein wesentlicher Beitrag zur ressourcenschonenden und nachhaltigen Entwicklung der Baupraxis geleistet. In weiteren Arbeiten werden zukünftig die identifizierten offenen Punkte wie beispielsweise Verbindungsmittel aus Carbon, Stabilitätsnachweise und standardisierte Rechenverfahren behandelt, um den Einsatz von Carbonbeton praxisgerecht weiter zu etablieren.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1] Bundesstiftung Baukultur, „Neue Umbaukultur“, Berlin : Bundestag, 2022/2023, Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/BKB-22/BBK\\_BKB-22-23.pdf](https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/BKB-22/BBK_BKB-22-23.pdf)
- [2] R. El Ghadioui, „Bemessung carbonbewehrter Betonbauteile unter besonderer Betrachtung des Gebrauchszustandes - Entwicklung eines Modells zur wirklichkeitsnahen Verformungsberechnung“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2020. doi: 10.26083/tuprints-00024337.
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung, Berlin., Januar 2024.
- [4] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin., Januar 2011.
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin., April 2013.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- 1. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung, Berlin., Januar 2024.
- 2. DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin., Januar 2011.
- 3. DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Berlin., April 2013.

### Autor

Felix Bohndorf, M.Sc.

### Handwerk und Studium

|                   |                                                                                                                 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 09/2014 – 02/2016 | Ausbildung zum Zimmerer, Abschluss Zimmerergeselle                                                              |
| 04/2016 – 07/2017 | Meisterschule im Zimmererhandwerk, Abschluss Zimmerermeister                                                    |
| 10/2021 – 12/2023 | Bachelorstudium Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München, Abschluss B.Sc. |
| 01/2024 – 09/2025 | Masterstudium Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Universität der Bundeswehr München, Abschluss M.Sc.   |

### Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München. Betreut wurde die Arbeit durch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml und Florian Zürnstein, M.Sc..

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN STAMPFLEHM ZUR VERÄNDERUNG DER MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI WIEDERHOLTEN FEUCHTE- UND TROCKNUNGSZYKLEN

## Bachelorarbeit

*Alicia Dietrich*

**Stampflehm, als lokal verfügbarer und ressourcenschonender Baustoff, erlangt durch die besonders energiearme Herstellung und aufgrund der zirkulären Wiederverwertbarkeit einen zunehmend aktuellen Betrachtungsfokus in der nachhaltigen Bauforschung. Anhand von experimentellen Untersuchungen an zylindrischen Stampflehmproben über mehrere Feuchte- und Trocknungszyklen hinweg, wird der Einfluss eines wiederholten Recyclingprozesses auf die mechanischen Festigkeitseigenschaften, die Materialqualität und die Veränderung in der Mikrostruktur der Tonminerale analysiert. Als gewinnbringende positive Erkenntnis wird deutlich, dass im Fokus einer dauerhaften Plastifizierung unter idealen Herstellungsbedingungen die wichtigen Materialkennwerte, wie die mittlere Druckfestigkeit und das Bindevermögen nicht nachteilig beeinflusst werden. Natürliche Zusatzstoffe können die mechanischen Eigenschaften, den Haftverbund und die Wasserleitfähigkeit zusätzlich verbessern. Die Forschungsergebnisse ermöglichen ein großes zukünftiges Potential für den Bausektor im Hinblick auf eine lukrative nachhaltige Bauweise mit geschlossener Kreislauffähigkeit des Baustoffes.**

**Keywords:** Stampflehm, Einaxialer Druckversuch, Recyclingzyklen, Zirkuläres Bauen

### Aktualitätsbezug und Fragestellung

Im Zuge der Klimakrise und der wachsenden Rohstoffknappheit wird auch in der Baubranche der Druck immer spürbarer. Aktuelle ökologische und ressourcenschonende Strategien im gesamtheitlichen Bauprozess zu etablieren. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Stampflehmprodukten.

Die Arbeit soll positiv zur ökologischen Energiebilanz und einer abfallvermeidenden Kreislaufwirtschaft im Bausektor beitragen. Wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zu Recyclingverfahren von Stampflehm (STL) z.B. durch mehrmalige Aufbereitung von Altlehm aus dem Gebäuderückbau sind noch in geringem Ausmaß zugänglich.

Es gilt präzise zu erforschen, ob bei Stampflehm Veränderungen in den physikalischen und mechanischen Grundeigenschaften auftreten, die langfristig Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit und Stabilität des Bauteils nach sich ziehen. Um innovative Empfehlungen für die praxisorientierte Anwendung zu erarbeiten, wird untersucht, wie die Materialqualität beim Herstellungsprozess bestmöglich beeinflusst werden kann. Ein weiterer Fokus liegt auf dem Einfluss von natürlichen Zusatzstoffen im Hinblick auf die Baustoffkennwerte von STL sowie die Anwendbarkeit von STL als Außenbauteil unter Feuchteinfluss.

## Prüfmethoden und Materialanalyse

Für alle untersuchten Probekörper wurde die auf dem Markt erhältliche STL-Mischung der Firma ClayTec verwendet. Die Mischung weist laut Hersteller Korngrößen von 0-16 mm (mit Überkorn bis 22 mm) und eine Trockenrohdichte von ca. 2300 kg/m<sup>3</sup> auf. Das Schwindmaß wird mit 0,5 % angegeben [1]. Zur weiteren Klassifizierung des Ausgangsmaterials wurden geotechnische Grundlagenversuche und ergänzende Laboranalysen (vgl. Tab 1) durchgeführt. Im Zuge der Arbeit wurden drei unterschiedliche Versuchsreihen betrachtet. Die Zahl am Ende der Nomenklatur gibt die Anzahl der Feuchte- und Trocknungszyklen an.

### Versuchsreihe 1: ClayTec\_01 – ClayTec\_04

Drei Recyclingvorgänge an unstabilisierten Stampflehmproben (insgesamt vier Feuchte- und Trocknungszyklen)

### Versuchsreihe 2: Stroh\_01 – Stroh\_03

Zwei Recyclingvorgänge an Stampflehmproben mit anfänglicher Zugabe von 0,3 M-% handelsüblichem Langhalmstroh, auf eine mittlere Länge von 5 – 10 cm gekürzt (insgesamt drei Feuchte- und Trocknungszyklen)

### Versuchsreihe 3: Regenversuche

Simulation eines schwachen und starken Regenereignisses an Stampflehmproben ohne Zusatzstoffe

| Prüfverfahren                                                   | Ergebnisse                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kombinierte Siebschlamm-analyse<br>DIN EN ISO 17892-4 [3]       | Ungleichförmiger gemischtkörniger Gr, si, sa                                                      |
| Korndichte<br>DIN EN ISO 17892-3 [4]                            | $\rho_s = 2,57 \text{ g/cm}^3$                                                                    |
| Natürlicher Kalkgehalt<br>DIN EN ISO 14688-1 [5]                | Leicht kalkhaltig, 1 – 5 % CaCO <sub>3</sub>                                                      |
| Organische Bestandteile durch Glühverlust<br>DIN EN 17685-1 [6] | Schwach organisch, 2 – 6 % der Trockenmasse                                                       |
| BET-Test<br>DIN ISO 9277 [7]                                    | Gut sortierte Probe mit Kaolinit als Hauptbestandteil<br>$a_{s,BET} = 12,96 \text{ m}^2/\text{g}$ |

Tab. 1: Übersicht über Materialanalysen vgl. [2]

## Herstellungs- und Lagerungsprozess

Um die mechanischen Festigkeitseigenschaften der STL-Mischungen optimal zu beeinflussen, wird für die Herstellung der zylindrischen Probekörper ( $\varnothing = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 200 \text{ mm}$ ) der Versuchsreihe 1 ein optimaler Wassergehalt von 8,0 – 8,5 % angestrebt. Bei Versuchsreihe 2 wurde aufgrund der saugfähigen Beschaffenheit des Langhalmstrohs zu Beginn ein höherer Wassergehalt von 9,32 % gewählt. Für eine erhöhte Bindekraft wird die Probemischung 24 h vor dem Mischvorgang mit bis zu 50 % der Gesamtmenge an Anmachwasser zum feuchten Ruhenlassen („Mauken“) angesetzt. Nach einer Mischdauer von circa 6,5 min wurde die beste homogene Verarbeitungskonsistenz für die erdfeuchte STL-Mischung (steif bis halbfest) erzielt. In Anlehnung an den Proctor-Test nach DIN 18127 [8] werden die zylindrischen Probekörper durch Einbringen von 5 Lagen im Proctortopf und je 25 Schlägen pro Schicht hergestellt. Zur Verdichtung der Probekörper wurde der Proctorautomat 2.151 der Firma FröWag GmbH, mit Fallgewicht von 2,5 kg (Aufschlagstück  $\varnothing 50 \text{ mm}$ ) und einer Fallhöhe von 300 mm, verwendet [2].

Die hergestellten Probezylinder wurden für eine natürliche Trocknungsphase von 15 Tagen bis zur Massekonstanz im Laborkeller bei einer Lufttemperatur von  $18 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit (RLF) von  $50 \pm 15 \text{ } \%$  aufbewahrt [2]. Die Proben der Versuchsreihe 1 erreichten einen mittleren Gleichgewichtsfeuchtegehalt von  $w = 1,2 \pm 0,3 \text{ } \%$ , ähnlich zur Versuchsreihe 2 mit  $w = 1,3 \pm 0,2 \text{ } \%$  [2].

## Einaxiale Druckfestigkeitsprüfung

Um planparallele Prüfoberflächen zu garantieren, wurden die Probekörper an den Druckflächen mit einer dünnen Schnellzementschicht ( $d < 5 \text{ mm}$ ) geglättet. Die Zylinderdruckversuche wurden mittels des Maschinenmodells ELS25a von GEOMATION durchgeführt. Auf den zentrisch eingespannten Probekörper wird eine axiale Belastung von  $0,2 \text{ } \%$  der Probekörperhöhe (Geschwindigkeit von  $0,4 \text{ mm/min}$ ) aufgebracht. Die Abweichung zur Verformungsgeschwindigkeit von  $1 - 2 \text{ } \%$  laut DIN EN ISO 17892-7 [9] beruht auf der Einordnung des Stampflehms als verkittetes Material. Um eine stabilisierende Wirkung auf die Festigkeit zu unterbinden, wird die Schnellzementschicht möglichst ganzheitlich von der Probenoberfläche abgetragen. Mit einem Schlaghammer werden die Probekörper nach jedem Wiederholungszyklus schonend bis zur Ausgangskonsistenz zerkleinert. Um den Masseverlust pro Recyclingzyklus gering zu halten, wurde der Wassergehalt abweichend von DIN EN ISO 17892-7 [9] nicht für jede Probe, sondern repräsentativ pro Recyclingzyklus für die gesamte Probemenge bestimmt. [2]

## Simulation eines Regenereignisses

Anwendungsfälle von bewitterten Außenbauteilen aus STL sind noch nicht ausreichend konkretisiert. In dem selbstdefinierten Versuchsaufbau aus Abb. 1 wird das hygroskopische Materialverhalten von vier Probekörpern analysiert.

Hierfür wurde ein einminütiges leichtes oder starkes Regenereignis aus einer Höhe von  $30 \text{ cm}$  durchgeführt. Der starke Regen wurde mittels einer Gießkanne aufgrund der sehr variablen Wassermenge nur einmalig simuliert. Die zwei Probekörper erreichten eine verminderte mittlere Festigkeit von  $1,81 \pm 0,08 \text{ N/mm}^2$ . Der leichte Regen wurde hingegen mit einer Spritzflasche erneut nach der Trocknungsdauer von 15 Tagen auf die jeweiligen zwei Probekörper aufgebracht. Die Druckfestigkeit lag im Bereich von  $1,80 \pm 0,15 \text{ N/mm}^2$ . Die ausgewaschenen Bodenpartikel wurden durch den Kunststoffbehälter mit einer Neigung von  $12^{\circ}$  aufgefangen, um den Masseverlust zur Trockenmasse [%] zu ermitteln. Um zuverlässige Trends zur Korrelation zwischen abgetragener Substratmenge und Druckfestigkeit aufzustellen, ist der Versuchsaufbau mit konstanter Steuerung der Beregnungsmenge genauer zu standardisieren. [2]

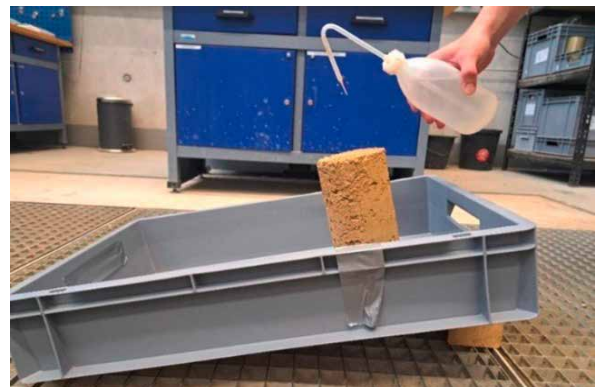


Abb. 1: Versuchsaufbau für Simulation des leichten Regens [2]

## Diskussion der Ergebnisse

Anhand einer weiteren Sieb-Schlämmanalyse am recycelten Endprodukt ClayTec\_04 lässt sich aufgrund der prozentualen Steigerung des Schlämmkornanteil  $\leq 0,063 \text{ mm}$  um  $7 \text{ } \%$  eine geringfügig erhöhte Mahlfineinheit erkennen [2]. Die Annahme wird durch den Vergleich der Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops (REM) aus Abb. 2 bestärkt. Die anfänglich offene Struktur der plättchenförmigen Zweischicht-Tonminerale hat sich in eine dichtere, aneinander ausgerichtete Partikelanordnung mit vermehrt anhaftenden Feinkornbestandteilen umsortiert.

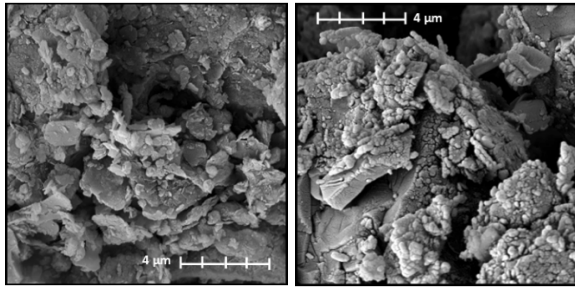


Abb. 2: REM-Aufnahmen (HV:10.0 kV und MAG: 15.0 kx) des Ausgangsmaterials (links) und des Recyclingprodukts (rechts)

Über die gesamte Versuchsreihe 1 wird der Grenzwert für tragende Stampflehmteile von  $2 \text{ N/mm}^2$  [10] mit einem arithmetischen Mittelwert von  $2,01 \text{ N/mm}^2$  eingehalten [2]. Schwankungen der Druckfestigkeit aufgrund eines unzureichenden Verdichtungsvorgangs können aufgrund einer nahezu konstanten Trockendichte von  $2,21 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  ausgeschlossen werden [2]. Als vergleichbare Literaturwerte für das Trendverhalten von Recyclinglehm wurde auf Versuchsergebnisse der Studie nach [11] an gepressten unstabilierten Lehmsteinen zurückgegriffen, die eine annähernd gleichbleibende Druckfestigkeit von  $2,6 \text{ MPa}$  über drei Feuchte- und Trocknungszyklen aufweisen.

Bei der Zugabe von Guarkernmehl als Biopolymerstabilisator stellt sich nach [11] über die Recyclingzyklen eine leichte Zunahme der Druckfestigkeit ein. Vergleichbar hiermit erzielt die Versuchsreihe 2 eine um  $18,4 \%$  gesteigerte mittlere Druckfestigkeit von  $2,38 \text{ N/mm}^2$  [2]. Durch die Faserstruktur des Stroh werden zusätzlich kapillare Feuchtetransportwege für eine verbesserte Wasserleitfähigkeit und eine höhere Verbundqualität ermöglicht.

Die veränderte feine Faserstruktur durch den Recyclingprozess beeinflusst die Querkzugfestigkeit und in Relation die Druckfestigkeit. Die Trockendichte erreicht einen Mittelwert von  $2,18 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  [2]. Die Abhängigkeit der mechanischen Festigkeitskennwerte von den Umgebungsbedingungen sind besonders zu betrachten. Mit steigender RLF nimmt der innere Saugdruck [MPa] und somit die Haftfestigkeit zwischen den Bodenpartikeln deutlich ab. Es resultiert dadurch eine reduzierte Druckfestigkeit. Abhängig von der Wasseraufnahmeregulierung der spezifischen Tonmineralart stellt sich eine Gleichgewichtsfeuchte im Bauteil ein. Der Trend einer erhöhten Druckfestigkeit bei reduziertem Gleichgewichtsfeuchtegehalt  $w$  [%] lässt sich in Abb. 3 nachvollziehen. Der Recyclingzyklus von Stroh\_03 mit  $w = 1,47 \%$  bei einer Druckfestigkeit von  $2,52 \text{ N/mm}^2$  folgt dieser Annahme nicht [2].

## Fazit und Zukunftsausblick

Für zukünftige Forschungsarbeiten wird eine Konditionierung der Trocknungsbedingungen z.B. mittels Klimakammer empfohlen, um ungewollte Beeinflussungen der Druckfestigkeit zu reduzieren [2]. Die Resultate der Arbeit verdeutlichen den enormen Bedarf zur Weiterentwicklung eines standardisierten zirkulären Recyclingprozesses bei verschiedenen Umgebungsbedingungen. Das Potential eines automatisierten Herstellungsverfahrens für den praktischen Stampflehm-Bau unter dem Einsatz von natürlichen Zusatzstoffen gilt es zukünftig weiter auszubauen.

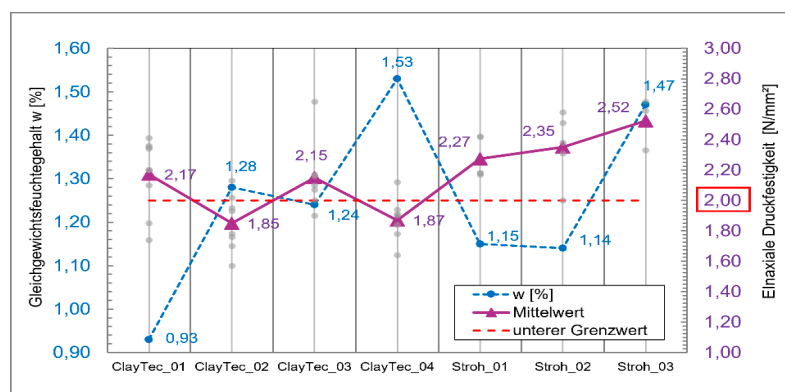


Abb. 3: Einaxiale Druckfestigkeit und Gleichgewichtsfeuchtegehalt aller Feuchte- und Trocknungszyklen der Versuchsreihe 1 und 2 in Anlehnung an [2]

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: ClayTec GmbH & Co. KG: Produktblatt Stampflehm – Art. 02.004, 02.008, 02.100, 02.200, 02.400, 02.600, 2025.
- [2]: Pfahler, K.; Dietrich, A.; Neidhart, T.; Thiel, C.: Circular Potential of Rammed Earth – An Experimental Analysis using repeated Recycling Cycles on Rammed Earth [Manuskript eingereicht zur Publikation für ICEC 2026]. RILEM, 2026-07.
- [3]: DIN EN ISO 17892-4:2017-04. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016).
- [4]: DIN EN ISO 17892-3:2016-07. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 3: Bestimmung der Korndichte (ISO 17892-3:2015, korrig. Fassung 2015-12-15).
- [5]: DIN EN ISO 14688-1:2020-11. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017).
- [6]: DIN EN 17685-1:2023-04. Erdarbeiten - Chemische Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung des Glühverlusts.
- [7]: DIN ISO 9277:2014-01. Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption - BET-Verfahren (ISO 9277:2010).
- [8]: DIN 18127:2012-09. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch.
- [9]: DIN EN ISO 17892-7:2018-05. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 7: Einaxialer Druckversuch (ISO 17892-7:2017).
- [10]: Röhlen, U.; Ziegert, C. (Hrsg.): Lehm-bau-Praxis – Planung und Ausführung. Beuth Verlag, 2020.
- [11]: Bruno, A.W.; Scott, B.; D'Offay-Mancienne, Y. et al.: Recyclability, durability and water vapour adsorption of unstabilised and stabilised compressed earth bricks. Materials and Structures, 2020.

### Für die Arbeit zusätzlich vordergründig verwendete Quelle:

1. Minke, G.: Handbuch Lehm-bau – Baustoffkunde Techniken Lehmarchitektur. Ökobuch, 2022.

### Autorin

Alicia Dietrich, B. Eng.

#### Ausbildung:

|                   |                                                                 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Seit 10/2025      | Masterstudium Bauingenieurwesen, Technische Universität München |
| 10/2021 – 07/2025 | Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg               |

#### Berufserfahrung:

|                   |                                                                      |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Seit 03/2026      | Werkstudentin bei der Implenia Hochbau GmbH am Standort München      |
| 03/2024 – 09/2025 | Werkstudentin bei der HITZLER INGENIEURE GmbH & Co. KG in Regensburg |
| 08/2023 – 12/2023 | Praxissemester bei der L-BAU-ENGINEERING GmbH in Linz                |

### Betreuer

Die Arbeit wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen an der OTH Regensburg in Zusammenarbeit mit dem Labor für Geotechnik und dem Labor für Baustoffkunde angefertigt. Die REM- und BET-Analysen wurden seitens des Lehrstuhls für Angewandte Natur- und Kulturwissenschaften unterstützt. Die praktische und fachliche Betreuung der Arbeit wurde von Katharina Pfahler, M. Eng. übernommen. Der Erstprüfer der Arbeit ist Florian Spirkl, M. Eng. und die Zweitprüferin Prof. Dr.-Ing. Charlotte Thiel.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# EINFLUSS DER CHEMISCHEN UND MINERALOGISCHEN ZUSAMMENSETZUNG AUF DIE REAKTIVITÄT VON ZIEGELMEHLEN ZUR BEWERTUNG IHRES POTENTIALS ALS ZEMENTZUSATZSTOFF

## Masterarbeit

Juliana Grosser

Ziegelmehle rücken aufgrund der sinkenden Verfügbarkeit herkömmlicher Zementzusatzstoffe (SCMs) zunehmend in den Fokus der Forschung, um die Zementindustrie umweltverträglicher zu gestalten. Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung auf die Reaktivität von Ziegelmehlen zu untersuchen, um deren Potenzial als SCM zu bewerten. Die Untersuchungen umfassten die Bestimmung physikalischer, chemischer, mineralogischer und struktureller Parameter von 11 Ziegelmehlen sowie einen Reaktivitätstest ( $R^3$ -Test) und Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln. Die Ergebnisse des  $R^3$ -Tests zeigten deutliche Unterschiede in der Reaktivität der Ziegelmehle, wobei der amorphe Anteil als entscheidender Einflussfaktor identifiziert wurde. Ziegelmehle mit hohem amorphem Anteil wiesen eine deutlich höhere Reaktivität auf als solche mit einem geringeren amorphen Anteil. Erwartungsgemäß nahmen mit steigender Reaktivität die Druckfestigkeiten der ziegelmehlhaltigen Mörtel zu. Desweiteren zeigte sich, dass die Reaktivität der Ziegelmehle mithilfe von FTIR-Analysen oder des Eisenoxidgehalts grob abgeschätzt werden kann, was für die Baubranche eine praxisnahe, vereinfachte und kostengünstigere Alternative zur Bestimmung des amorphen Anteils mittels XRD-Analyse darstellt.

**Keywords:** Zement, Zementzusatzstoffe, Ziegelmehl, Druckfestigkeiten,  $R^3$ -Test, Reaktivität, Amorpher Anteil, Infrarotspektroskopie, Eisenoxidgehalt

## Zielsetzung

Diese Arbeit baut auf einer im Rahmen der Bachelorarbeit durchgeführten Machbarkeitsstudie auf [1], in der gezeigt wurde, dass Ziegelmehle grundsätzlich eine gewisse Reaktivität aufweisen und als puzzolanisch, weniger reaktives SCM ein

geordnet werden können. Allerdings unterliegt ihre Reaktivität erheblichen Schwankungen, die auf Unterschiede in der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung infolge geologisch bedingter Rohstoffvariationen sowie variierender

Herstellungs- und Brennparameter zurückzuführen sind. Eine systematische Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Reaktivität fehlt bislang. Basierend darauf untersucht diese Masterarbeit den Einfluss der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung von Ziegelmehlen auf die Reaktivität. Um den Einfluss physikalischer Eigenschaften, insbesondere der Mahlfeinheit, zu minimieren, wurden die untersuchten Ziegelmehle auf eine vergleichbare spezifische Oberfläche zwischen 8300 und 9400 cm<sup>2</sup>/g eingestellt.

## Versuchsmatrix

Für die Versuche wurden 11 verschiedene Ziegelmehle verwendet, welche mit der Abkürzung Z1 bis Z11 bezeichnet wurden. Als Referenz-SCM diente Kalksteinmehl (KS). Die Charakterisierung der Ziegelmehle umfasste die Bestimmung der physikalischen Parameter (Dichte, spezifische Oberfläche nach Blaine/ BET). Im Folgenden wird unter der spezifischen Oberfläche, sofern nicht anders angegeben, die Blaine-Oberfläche verstanden. Zusätzlich wurden die chemischen und mineralogischen Zusammensetzungen der Ziegelmehle mittels optischen Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) und quantitativer Röntgendiffraktometrie (QXRD) ermittelt. Zur Bestimmung der Struktur wurden die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) sowie <sup>27</sup>Al- und <sup>29</sup>Si-Magic-Angle-Spinning-Kernspinresonanzspektroskopie (MAS-NMR) durchgeführt. Die Reaktivität der 11 Ziegelmehle wurde mithilfe des R<sup>3</sup>-Tests abgeschätzt [2]. Die isotherme Wärmeflusskalorimetrie von Zementpasten bei 20 °C diente der Untersuchung des Hydrationsverlaufs anhand des gemessenen Wärmeflusses, wobei die Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede zeigten und daher nicht weiter dargestellt werden. Die Druckfestigkeiten der Mörtel wurden gemäß Norm DIN EN 196-1 bestimmt, wobei 20 Ma.-% der Zementmenge eines CEM I 52,5 R durch jeweils eine der 11 Ziegelmehlproben ersetzt wurde, um den Einfluss der verschiedenen Ziegelmehle auf die Festigkeiten der Mörtel zu untersuchen [3].

## Reaktivität der Ziegelmehle

Zur Abschätzung der Reaktivität der Ziegelmehle wurde der R<sup>3</sup>-Test, welcher sich aus der Messung der Gesamtwärme und des Portlanditverbrauchs bei 40 °C nach sieben Tagen zusammensetzt, durchgeführt [4]. Auf Grundlage der durchgeführten Messungen konnten die Ziegelmehle sowie KS als puzzolanische oder inerte SCMs eingeordnet werden (Abb. 1).

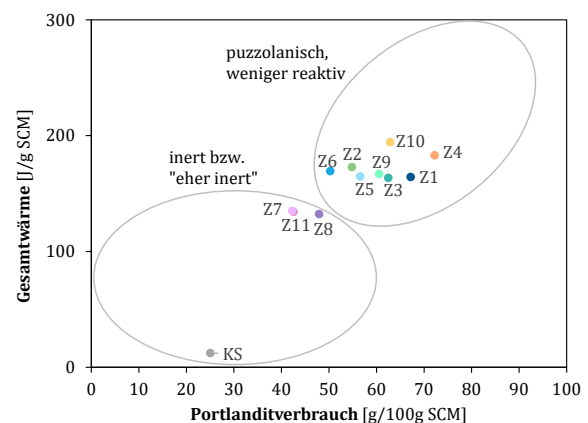


Abb. 1: Einordnung der Zementzusatzstoffe anhand des Portlanditverbrauchs in [g/100 g SCM] sowie der Gesamtwärme in [J/g SCM] nach sieben Tagen.

Mit zunehmendem Abstand vom Ursprung steigen sowohl Gesamtwärme und Portlanditverbrauch an, was in Übereinstimmung mit den Beobachtungen von *Suraneni et al.* auf eine höhere Reaktivität hindeutet [4]. Die Ergebnisse des R<sup>3</sup>-Tests zeigten, dass die Reaktivitäten der untersuchten Ziegelmehle deutliche Unterschiede aufweisen. KS wurde aufgrund seiner geringen Gesamtwärmefreisetzung und seines niedrigen Portlanditverbrauchs als inertes SCM eingestuft, womit die aus der Literatur bekannte Einordnung von KS als inertes SCM bestätigt wurde [4]. Ebenso wurden die Ziegelmehle Z7, Z8 und Z11 formal dieser Kategorie zugeordnet. Dabei ist zu beachten, dass diese Ziegelmehle als „eher inert“ bezeichnet werden, da im Vergleich zu KS eine gewisse Reaktivität erkennbar war, die jedoch etwas geringer ausfiel als bei den übrigen Ziegelmehlen. Die Ziegelmehle Z1 bis Z6 sowie Z9 und Z10 lassen sich hingegen als puzzolanisch, weniger reaktive SCMs einordnen.

## Einflussfaktoren auf die Reaktivität

Allgemein ist die Reaktivität von physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften der SCMs abhängig, die im Folgenden analysiert werden, um die im R<sup>3</sup>-Test erkennbaren Unterschiede zu erklären und maßgebliche Einflussparameter für die Reaktivität der Ziegelmehle zu identifizieren [5].

Physikalische Eigenschaften: Da die Ziegelmehle auf vergleichbare spezifische Oberflächenwerte nach Blaine eingestellt wurden, wurde davon ausgegangen, dass die geringen Schwankungen der spezifischen Oberfläche keinen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktivität ausüben.

Amorpher Anteil: Wie in der Literatur beschrieben, stellt der amorphe Anteil vorrangig die reaktive Phase der SCMs dar, weshalb dessen massenbezogene Menge und die chemische Zusammensetzung des amorphen Anteils für die Reaktivität des SCMs von Bedeutung sind [5]. Versuche von *Snellings et al.* und weiteren Forschungsgruppen zeigten, dass SCMs mit einem höheren amorphen Anteil in der Regel eine höhere Reaktivität aufweisen als SCMs mit einem niedrigeren amorphen Anteil [5, 6]. Wird daher der Zusammenhang zwischen der Reaktivität, die anhand der im R<sup>3</sup>-Test gemessenen Gesamtwärme abgeschätzt wurde, und der massenbezogenen Menge des amorphen Anteils (Abb. 2) betrachtet, zeigt sich deutlich: Mit steigendem amorphem Anteil nimmt die Gesamtwärme zu und damit einhergehend auch die Reaktivität, weshalb der amorphe Anteil als Einflussfaktor für die Reaktivität identifiziert werden kann.

Eisenoxidgehalt: Der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt der Ziegelmehle hängt wesentlich von den geologischen Bedingungen der Ausgangsstoffe ab und ist verantwortlich für die charakteristisch rot-orange Färbung der Ziegel. Neben der Farbgebung scheint der Eisenoxid-Gehalt auch eine grobe Abschätzung der Reaktivität von Ziegelmehlen zu ermöglichen. Grundlage dieser Überlegung ist der Zusammenhang zwischen dem Eisenoxidgehalt und der Reaktivität von Tonen, die die Ausgangsstoffe der Ziegel darstellen. Ein erhöhter Eisenoxidgehalt kann die Reaktivität von Tonmineralen auf

zwei Arten erhöhen. Ein höherer Hämatitgehalt geht mit einer erhöhten spezifischen Oberfläche einher. Außerdem führt der Einbau von Eisen anstelle von Aluminium in der Tonmineralstruktur zu einer geringeren Kristallinität, was die Reaktivität zusätzlich erhöht [7]. Wird daher der Zusammenhang zwischen der Reaktivität im R<sup>3</sup>-Test und dem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt betrachtet, zeigt sich: Mit steigendem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt ist eine höhere Gesamtwärme und damit einhergehend eine höhere Reaktivität zu erkennen, weshalb der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt als Parameter herangezogen werden kann, um die Reaktivität der Ziegelmehle grob abzuschätzen.

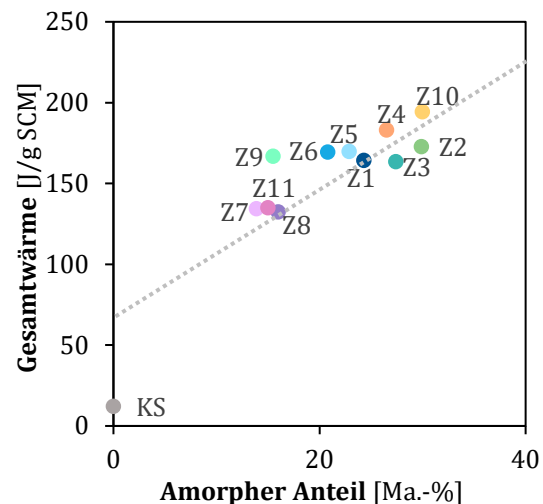


Abb. 2: Zusammenhang zwischen amorphem Anteil in [Ma.-%] und der Gesamtwärme nach sieben Tagen in [J/g SCM] im R<sup>3</sup>-Test (hier: Gesamtwärme als Maß für die Reaktivität).

## FTIR als praxisnahe Methode zur Abschätzung des amorphen Anteils

Da der amorphe Anteil zuvor als ein maßgeblicher Einflussfaktor für die Reaktivität identifiziert worden ist, sollte zudem aufgezeigt werden, dass sich die FTIR-Spektroskopie als vergleichsweise einfache und schnelle Methode eignet, um den amorphen Anteil – und damit indirekt die Reaktivität – abzuschätzen. Die zwischen 1250 cm<sup>-1</sup> und 800 cm<sup>-1</sup> liegende Hauptbande der FTIR-Spektren stellt die Überlagerung verschiedener asymmetrischer Si-O-T-Streckschwingungen dar, wie die Dekonvolution der FTIR-Spektren in Abb. 3 exemplarisch für Z1, Z7 und Z10 zeigt [8]. Die

Hauptbande weist entweder eine symmetrische Form mit zwei Peaks (Z1), eine asymmetrische Form mit Ausprägung nach links, d. h. zu höheren Wellenzahlen (Z10), oder eine asymmetrische Form mit Ausprägung nach rechts, d. h. zu niedrigeren Wellenzahlen (Z7), auf. Die qualitative Betrachtung verdeutlicht, dass Z10 im Vergleich zu Z7 einen größeren Anteil amorpher Phasen (blauer Peak) und einen geringeren Anteil kristalliner Phasen (rote & gelbe Peaks) enthält. Z1 zeigt im Bereich der amorphen Phasen einen größeren Peak als Z7, jedoch einen kleineren als Z10. Die Peaks der kristallinen Phasen sind bei Z1 deutlich ausgeprägter als bei Z10. Diese Beobachtungen stimmten mit den Ergebnissen der XRD-Analysen überein: Z10 wies den höchsten amorphen Anteil auf, Z1 lag im mittleren Bereich und Z7 besaß dabei den niedrigsten Anteil. Werden die FTIR-Spektren der 11 Ziegelmehle mit den jeweiligen amorphen Anteilen verglichen, so zeigte sich ein Trend. Ziegelmehle mit einer nach links verschobenen asymmetrischen Hauptbande besitzen tendenziell einen höheren amorphen Anteil, während eine Ausprägung nach rechts mit einem geringeren amorphen Anteil einherging. Symmetrische Hauptbanden lagen meist im mittleren Bereich. Die Form der FTIR-Hauptbande konnte somit als qualitativer Indikator für die massenbezogene Menge des amorphen Anteils und die Reaktivität der Ziegelmehle herangezogen werden.

### Amorpher Anteil & Druckfestigkeiten

Die im R<sup>3</sup>-Test festgestellten Reaktivitäten der Ziegelmehle korrelieren nach *Avet et al.* mit den Druckfestigkeiten der Normmörtel insbesondere bei Betrachtung von Spätfestigkeiten, was auch

bei den Ziegelmehlen bestätigt werden konnte [9]. Abb. 4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem amorphen Anteil, der im R<sup>3</sup>-Test als maßgeblicher Einflussfaktor identifiziert wurde, und den 90-Tage-Druckfestigkeiten. Mit höherem amorphem Anteil in den Ziegelmehlen nahmen die Druckfestigkeiten der ziegelmehlhaltigen Mörtel in höherem Hydratationsalter zu. Somit konnte der amorphe Anteil als maßgeblicher Einflussparameter für die Reaktivität der Ziegelmehle bestätigt werden.

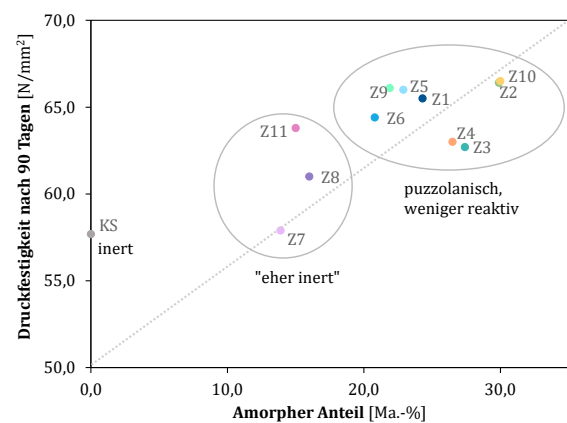


Abb. 4: Zusammenhang zwischen amorphem Anteil in [Ma.-%] und den Druckfestigkeiten der ziegelmehlhaltigen Mörtel nach 90 Tagen in [N/mm²].

### Zusammenfassung

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse der Masterarbeit, dass insbesondere der amorphe Anteil die Reaktivität der Ziegelmehle und somit die Druckfestigkeiten der ziegelmehlhaltigen Mörtel maßgeblich bestimmt. Dieser kann praxisnah mithilfe von FTIR-Analysen oder des Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalts abgeschätzt und damit als entscheidender Faktor zur Bewertung ihres Potenzials als SCM herangezogen werden, was die gezielte Auswahl geeigneter Ziegelmehle zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie ermöglicht.

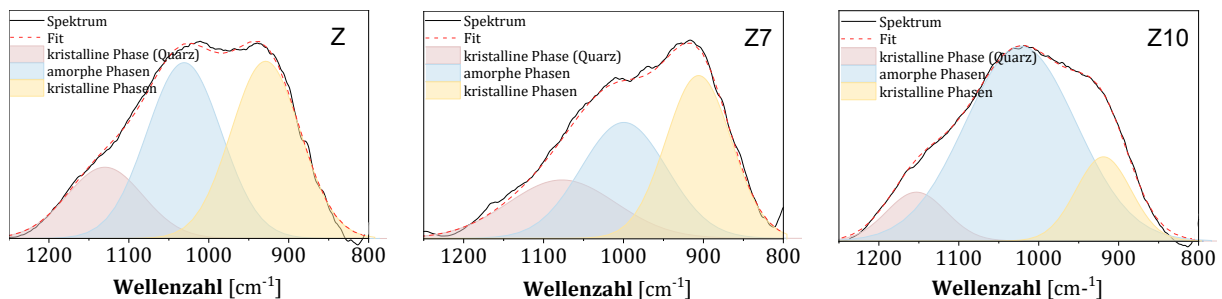


Abb. 3: Dekonvolution der FTIR-Spektren der Ziegelmehle Z1, Z7 und Z10 im Bereich 1250 cm<sup>-1</sup> bis 800 cm<sup>-1</sup>.

## Literaturverzeichnis

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

- [1]: J. Grosser, "Untersuchungen zur Wirksamkeit von Ziegelmehl als Zementzusatzstoff im Vergleich zu Steinkohleflugasche". Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- [2]: Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 196-12: Prüfverfahren für Zement -Teil 12: Reaktivität von Zementbestandteilen
- [3]: Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Berlin
- [4]: P. Suraneni, A. Hajibabaei, S. Ramanathan, Y. Wang und J. Weiss, "New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials," Cement and Concrete Composites, Jg. 103, S. 331–338, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017.
- [5]: J. Skibsted und R. Snellings, "Reactivity of supplementary cementitious materials in cement blends," Cement and Concrete Research, Jg. 124, S. 105799, 2019. doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105799.
- [6]: R. Snellings, P. Suraneni und J. Skibsted, "Future and emerging supplementary cementitious materials," Cement and Concrete Research, Jg. 171, S. 107199, 2023. doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107199.
- [7]: T. R. Muzenda, F. Georget und T. Matschei, "Investigating the Origin of the Impact of Iron Impurities on Performance of Calcined Clay Limestone Cement," in Calcined Clays for Sustainable Concrete, K. Scrivener, M. Sharma und F. Zunino, Hg., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, S. 77–87.
- [8]: N. B. Bohara, L. B. Bhat, D. B. Ghale, N. Duwal und J. Bhattarai, "Investigation of the firing temperature effects on clay brick sample; Part-I: Mineralogical phase characterization," BIBECHANA, Jg. 16, S. 122–130, 2018. doi: 10.3126/bibechana.v16i0.21319.
- [9]: F. Avet, R. Snellings, A. Alujas Diaz, M. Ben Haha und K. Scrivener, "Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays," Cement and Concrete Research, Jg. 85, S. 1–11, 2016.

### Autor

Juliana Grosser, Master of Science (Note 1,0), TU München  
 ab 2026 Junior Projektleitung (zuvor Werkstudentin 2021 – 2025), BLUES GmbH, München  
 2022 – 2025 Studentische Hilfskraft, Professur für Mineral Construction Materials, TU München  
 2019 – 2025 Bachelor-/Masterstudentin des Umwelt-/Bauingenieurwesens, TU München

### Betreuer

Die Arbeit wurde an der TUM School of Engineering and Design, Department of Materials Engineering, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Professur für Mineral Construction Materials der TU München angefertigt. Die Betreuung erfolgte durch Prof. Dr. Alisa Machner (TUM), Luis Schnürer, M.Sc. (TUM), sowie Dr. Alexander Engbert (ZIZ Ziegel-Innovations-Zentrum GmbH).

### Sonstiges

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen von Juliana Grosser gemeinsam mit Prof. Dr. Alisa Machner, Luis Schnürer, M.Sc., und Dr. Alexander Engbert als Journalpaper in Construction and Building Materials veröffentlicht werden.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
 über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# EXPERIMENTELLE ANALYSE DES TRAGVERHALTENS VON PLANZIEGELMAUERWERK MIT LEHMDÜNNBETTMÖRTEL UNTER VERSCHIEDENEN FEUCHTEEINFLÜSSEN

## Bachelorarbeit

*Isabella Hofbauer*

**Ausgangspunkt ist die Problematik konventioneller Mörtelsysteme im Hinblick auf Rückbau und Nachhaltigkeit, da zementgebundene Mörtel eine sortenreine Trennung erschweren. Lehm Mörtel hingegen weist eine reversible Bindung auf, die sich bei Wassereinwirkung lösen lässt und eine schadensfreie Wiederverwendung der Bausteine ermöglicht. Ziel der Arbeit war die Untersuchung, ob Lehmdünnbettmörtel im Verbund mit Planziegeln eine tragfähige und ökologische Alternative darstellt, insbesondere unter Feuchteeinfluss. Im Fokus stand, inwiefern Feuchteänderungen die mechanischen Eigenschaften und die Druckfestigkeit des Verbunds beeinflussen. Hierzu wurden verschiedene Prüfkörpertypen unter normierten Bedingungen hergestellt und unterschiedlichen Feuchtebedingungen ausgesetzt. Die Druckfestigkeit wurde als zentrale Kenngröße ermittelt, um eine fundierte Einschätzung der baupraktischen Anwendbarkeit zu ermöglichen.**

**Keywords:** Lehmdünnbettmörtel, Planziegelmauerwerk, Feuchteinflüsse, Druckfestigkeit

## Problemstellung und Zielsetzung

Die Etablierung rückbaubarer Bauweisen scheitert häufig an zementgebundenen Mörteln, deren irreversible Bindungen eine sortenreine Trennung verhindern. Lehm Mörtel bietet durch seine physikalisch reversible Bindung eine Alternative. Unter Wassereinwirkung wird er erneut plastisch und ermöglicht einen zerstörungsfreien Rückbau von Mauerwerk. Damit unterstützt Lehmdünnbettmörtel die

Prinzipien der zirkulären Bauwirtschaft und der Ressourcenschonung. [1]

Diese Reversibilität stellt jedoch während der Nutzungsphase eine potenzielle Gefährdung der mechanischen Stabilität dar. Nach Brinkmann [2] ist die Feuchtesensibilität eine zentrale Herausforderung, da bereits moderate Erhöhungen der relativen Luftfeuchtigkeit zu deutlichen Festigkeitsverlusten und Veränderungen im Spannungs-Dehnungs-Verhalten führen können.

Vor diesem Hintergrund untersucht die Arbeit die Eignung von Lehm dünnbettmörtel im Verbund mit Planziegeln unter variierenden Feuchtebeanspruchungen. Anhand systematischer Druckfestigkeitsversuche wird analysiert, wie sich Feuchte auf mechanische Eigenschaften und Bruchverhalten auswirkt, um die technische Machbarkeit dieser nachhaltigen Alternative sowie ihre normative Einordnung zu bewerten.

## Vorgehensweise

Um den Einfluss variierender Feuchtebedingungen auf das Tragverhalten systematisch zu analysieren, wurden Mauerwerks- und Zwei-Stein-Prüfkörper unter normgerechter Fugenausbildung hergestellt. Zur Ermittlung der Druckfestigkeit als zentrale Kenngröße des Stein-Mörtel-Verbunds wurden die Proben gezielt fünf Szenarien ausgesetzt, um Feuchtebeanspruchungen praxisnah zu simulieren. Neben der Referenzlagerung unter Laborbedingungen und im Normklima nach DIN 18945 (23 °C, 50 % r.F.) [3] beinhalteten die Szenarien die Lagerung bei erhöhter Luftfeuchtigkeit (23 °C, 70 % r.F.), die vollständige Trocknung bei 100 °C sowie eine gezielte Beregnung zur Simulation von Starkregenereignissen.

## Untersuchung der Mauerwerksdruckfestigkeit

Basierend auf den Planziegelmaßen von 373 mm x 249 mm wurden gemäß DIN EN 1052-1 [4] RILEM-Prüfkörper mit den Abmessungen 1,12 m x 1,25 m hergestellt. Die Ausführung erfolgte als Läuferverband mit einem Überbindemaß von 0,4, wobei pro Versuchsreihe mindestens drei Probekörper zum Einsatz kamen.

Der normgerechte Versuchsaufbau im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der OTH Regensburg realisiert über Hydraulikzylinder und Lasteinleitungsriegel eine gezielte, zentrische

Kraftaufbringung. Während eine Sicherungsvorrichtung seitliche Bewegungen verhindert, zeichnen Kraftmessdosen und Wegaufnehmer das mechanische Verhalten des Prüfkörpers unter Last detailliert auf. Die Prüfprozedur sieht eine kontinuierliche Laststeigerung bis zum Versagen vor, wobei die Belastungsrate an die Festigkeit des Mauerwerks angepasst wird.

## Auswertung der Mauerwerksdruckfestigkeit

Das Tragverhalten von Mauerwerk unter extremen klimatischen Einflüssen wurde durch eine gezielte, einseitige Beregnung simuliert, die sich an den Unwetterwarnkriterien des Deutschen Wetterdienstes orientiert [5]. Hierbei wurde ein Volumenstrom von ca. 7,8 l/(m<sup>2</sup>·min) appliziert, um die Auswirkungen einer massiven Schlagregenbelastung auf das Verbundsystem aus Planziegel und Lehm dünnbettmörtel zu untersuchen. Der Versuchsablauf sah vor, die Bewässerung bei ca. 490 kN, was der Hälfte der erwarteten Bruchlast entspricht, zu starten.

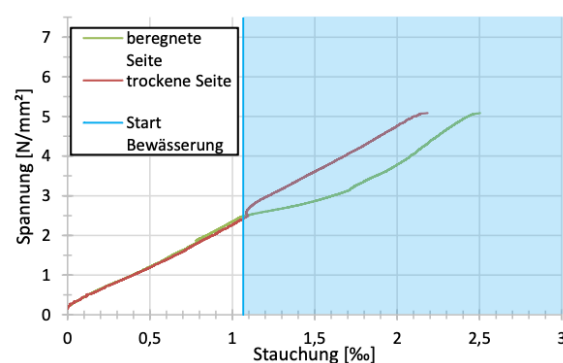


Abb. 1: Spannungs-Dehnungs-Kurve des Prüfkörpers 3 (PK3) mit dem Zeitpunkt der Bewässerung

Die Auswertung der Versuchsdaten verdeutlicht eine signifikante Sensibilität des Lehm dünnbettmörtels (LDM) gegenüber direkter Feuchteeinwirkung. Infolge der Wasseraufnahme reduzierte sich die mittlere Bruchspannung von 6,0 N/mm<sup>2</sup> im trockenen Zustand auf 5,6 N/mm<sup>2</sup>. Gleichzeitig sank der Elastizitätsmodul von 3.000 N/mm<sup>2</sup> auf 2.500 N/mm<sup>2</sup>, was eine

deutliche Abnahme der Steifigkeit des Mauerwerkssystems belegt. In den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen manifestiert sich dieser Effekt durch einen markanten „Knick“ zum Zeitpunkt des Bewässerungsstarts. Während die trockene Seite der Prüfkörper weiterhin einen stetigen Spannungsanstieg aufwies, flachte der Kurvenverlauf der beregneten Seite sichtbar ab. Dies veranschaulicht die Abbildung 1 beispielhaft an dem Prüfkörper 3.

Diese asymmetrische Schwächung führte zu einer messbaren horizontalen Verschiebung der Prüfkörperoberseite in Richtung der nicht beregneten Seite, was eine zusätzliche exzentrische Belastung induzierte. Die Wasseraufnahme erhöhte außerdem die Bruchstauchung, was ein weiches Materialverhalten belegt. Die Bruchbilder zeigten aufgeweichte Lagerfugen und Versagenszonen in den durchfeuchteten Bereichen.

### Spannungs-Dehnungs-Linien der Mauerwerksprüfkörper

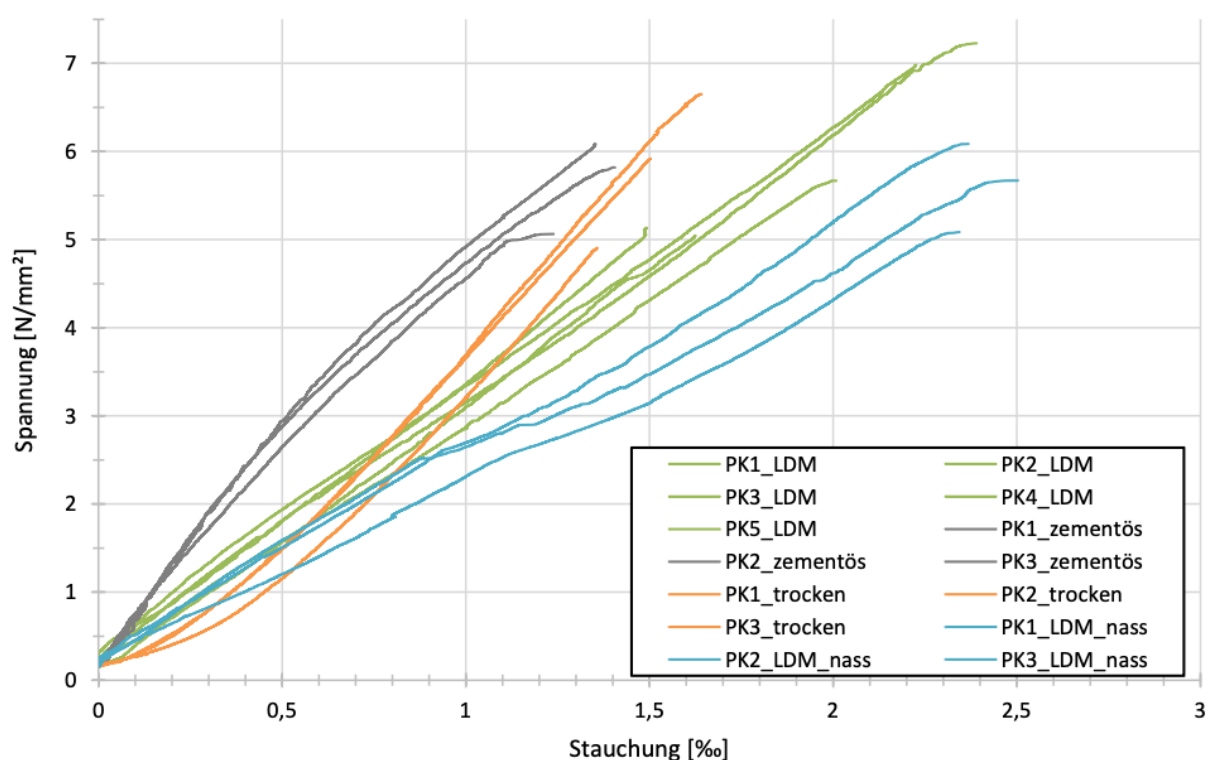


Abb. 2: Spannungs-Dehnungs-Kurven mit allen Mauerwerksversuchsreihen

Ergänzend zu den Untersuchungen des Lehm dünnbettmörtels wurden Vergleichsversuche mit zementösem Dünnbettmörtel sowie Trockenmauerwerk durchgeführt, um die erzielten Ergebnisse in einen baupraktischen Kontext einordnen zu können. Ziel dieser Gegenüberstellung war es, Unterschiede im Tragverhalten, in der Steifigkeit sowie im Versagensmechanismus systematisch herauszuarbeiten und den Lehm dünnbettmörtel gegenüber etablierten Bauweisen zu bewerten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Lehm dünnbettmörtel trotz geringerer Steifigkeit

eine vergleichbare, teilweise sogar leicht höhere Tragfähigkeit als das zementgebundene Mauerwerk erreichen kann. Gleichzeitig scheint sich gegenüber dem Trockenmauerwerk ein kontrollierteres und weniger sprödes Versagen abzuzeichnen. Damit liefern die Vergleichsuntersuchungen eine Grundlage für die Einordnung des Materials hinsichtlich seiner mechanischen Leistungsfähigkeit und seiner baupraktischen Eignung, wenngleich die Ergebnisse im Kontext der gewählten Randbedingungen zu interpretieren sind. Die

Ergebnisse aller Mauerwerksprüfkörper wurden in der Abbildung 2 veranschaulicht.

## Untersuchung der Druckfestigkeit von Zwei-Stein-Prüfkörper

Die Zwei-Stein-Prüfkörper bestanden aus zwei übereinandergestapelten Planziegel, die durch eine Mörtelfuge miteinander verbunden wurden. Die Abmessungen der Prüfkörper lagen bei  $373 \times 175 \times 500$  mm. Für jede Versuchsreihe wurden in der Regel drei, in Ausnahmefällen zwei Prüfkörper untersucht. Die Druckbelastung der Prüfkörper erfolgte mit einer konstanten Belastungsrate von  $0,05 \text{ N/mm}^2$  pro Sekunde entsprechend den Vorgaben der DIN EN 772-1 [6]. Da die Anordnung hierbei ohne das im Mauerwerksbau übliche Überbindemaß erfolgte, dienen die ermittelten Druckfestigkeiten primär dem relativen Vergleich unterschiedlicher Feuchteszenarien.

Die experimentelle Analyse der Zwei-Stein-Prüfkörper ergab unter Normklima eine mittlere Druckfestigkeit von  $10,47 \text{ N/mm}^2$ . Durch eine Trocknung auf 0 % r. F. konnte dieser Wert auf  $11,90 \text{ N/mm}^2$  gesteigert werden, was jedoch zu einem spröderen Versagen führte. Im Gegensatz dazu bewirkte direkter Wasserkontakt einen signifikanten Leistungsabfall. Bei simulierter Beregnung von oben sank die Festigkeit auf  $7,97 \text{ N/mm}^2$ , wohingegen die seitliche Einwirkung in  $9,37 \text{ N/mm}^2$  und einem asymmetrischen Schadensbild resultierte. Eine auf 70 % erhöhte relative Luftfeuchtigkeit führte zu einer leichten Festigkeitssteigerung auf  $11,19 \text{ N/mm}^2$ , was als Indiz dafür gewertet werden kann, dass moderate Feuchte nicht zwingend zu einer Festigkeitsminderung führt. Zur vergleichenden Bewertung visualisiert die Abbildung 3 die auf das Normklima bezogenen Druckfestigkeiten der Zwei-Stein-Prüfkörper in Abhängigkeit der variierenden Feuchteszenarien. Während sich zwischen 0 %, 50 % und 100 % r. F. ein linearer

Festigkeitsabfall andeutet, liegt das Ergebnis bei 70 % r. F. unerwartet über dem Normklima.

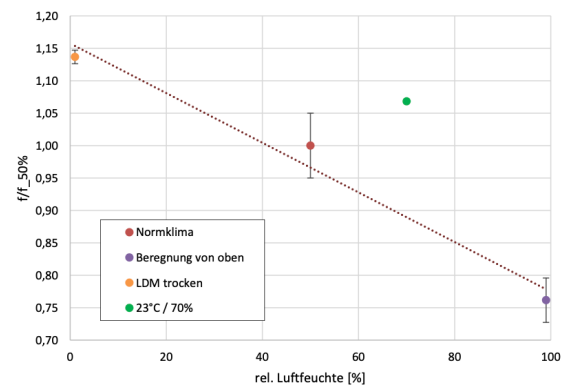


Abb. 3: Normierte Druckfestigkeit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit

## Zusammenfassung und Fazit

Die Untersuchungen bestätigen einen maßgeblichen Einfluss des Feuchtezustands auf das Tragverhalten, wobei insbesondere direkter Wasserkontakt zu einer signifikanten Reduktion der Druckfestigkeit und einer verringerten Steifigkeit führt. Diese durch Beregnung verursachte Entfestigung äußert sich in einem deutlichen Abfall des E-Moduls sowie einer weicheren Verformungscharakteristik und führt infolge der lokalen Aufweichung des Mörtels zu asymmetrischen Schadensverläufen entlang der Fuge. Demgegenüber scheinen sich moderate Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit nur geringfügig auf die Festigkeit auszuwirken, was die Befürchtung relativieren könnte, dass bereits klimatische Schwankungen die Tragfähigkeit substanziell beeinträchtigen. Die Vergleichsuntersuchungen mit zementösem Dünnbettmörtel und Trockenmauerwerk deuten zudem auf eine vergleichbare Tragfähigkeit bei gleichzeitig weniger sprödem Versagensverhalten hin. Zusammenfassend belegen die Ergebnisse, dass Lehm dünnbettmörtel bei konstruktivem Feuchteschutz eine leistungsfähige Alternative darstellt.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schroeder, H.: Lehm bau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.
- [2]: Brinkmann, M.: Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm mauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2023.
- [3]: DIN 18945: Lehm steine - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. Ausgabe März 2024.
- [4]: DIN EN 1052-1: Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 1052-1:1998. Ausgabe Dezember 1998.
- [5]: Wetterdienst, D.: Deutscher Wetterdienst - Unwetterwarnkriterien, 2025, <https://www.wettergefahren.de/warnungen/unwetterwarnkriterien.html> [Zugriff am: 29.06.2025].
- [6]: DIN EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche und Englische Fassung EN 772-1:2011+A1:2015. Ausgabe Mai 2016.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Brinkmann, M.: Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm mauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2023.
2. DIN EN 1996-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Ausgabe Dezember 2019.
3. DIN 18946: Lehm mauer mörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. Ausgabe März 2023.

## Autor

Isabella Hofbauer, B. Eng

### Studium:

Seit 10/2025: Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg  
 10/2021 – 09/2025: Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

### Berufserfahrung:

10/2025 – heute: Studentische Hilfskraft im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, OTH Regensburg  
 10/2024 – 10/2025: Werkstudentin bei Strabag AG Regensburg  
 02/2024 – 08/2025: Werkstudentin bei Lindner Group München  
 08/2023 – 12/2023: Studienbegleitendes Pflichtpraktikum bei Lindner SE Kopenhagen  
 02/2023 – 08/2023: Werkstudentin bei Klebl GmbH Penning

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der OTH Regensburg.  
 Betreuer der Arbeit waren M.Eng. Franziska Amberger und Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer.  
 Zweitprüfer war Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
 über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG DES FESTIGKEITS- POTENTIALS VON LEICHTBETONREZYKLATEN

## Bachelorarbeit

Barbara Hölzl

Monolithische Bauweisen fördern das Ziel der Recyclierbarkeit und gewinnen daher im Bauwesen zunehmend an Bedeutung. Dies erfordert fundierte Erkenntnisse zur Wiederverwendung rezyklierter Materialien aus Leichtbetonen. Ziel dieser Bachelorarbeit war es, das Festigkeitspotential von drei rezyklierten Leichtbeton-Sorten mithilfe zweier unterschiedlicher Prüfverfahren zu untersuchen und zu bewerten. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden Prüfmethoden nach DIN 13055 [1] bzw. DIN 4226-3 [2] für unterschiedliche Anwendungen geeignet sind, wobei letzteres Verfahren eine praxisnähere Beurteilung ermöglicht. Zudem wurde festgestellt, dass Unterschiede hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften und Korneigenschaften der Rezyklate maßgeblich die Zusammenhänge zwischen Verdichtungsmaß, Wasseraufnahme, Kornfestigkeit und Kornrohdichte beeinflussen und eine höhere Berücksichtigung des Saugwassers zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit sinnvoll ist. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen dazu bei, die Weiterentwicklung entsprechender Regelwerke zu unterstützen und damit den zukünftigen Einsatz rezyklierter Leichtbetone als nachhaltigen Baustoff im Baugewerbe zu fördern.

**Keywords:** Leichtbeton, Recyclingleichtbeton, Rezyklat, Festigkeitspotential, Kornfestigkeit, Wasseraufnahme, Recycling, Gefügestruktur

## Hintergrund und Motivation des Leichtbetonrecyclings

In der Bauwirtschaft gewinnt durch den zunehmenden Kreislaufgedanken die monolithische Bauweise an Bedeutung.

(Infra-)Leichtbeton ist aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit hierfür besonders geeignet, da

auf eine zusätzliche Wärmedämmung verzichtet werden kann und die Recyclierbarkeit durch die erleichterte Materialtrennung unterstützt wird. Um diesen Vorteil praktisch nutzbar zu machen, sind systematische Untersuchungen zum Recyclingpotential von Leichtbetonen sowie entsprechende Regelungen zur Wiederverwendung erforderlich.

## Grundlagen zu Leichtbeton und Recyclingbeton

Einführend wurden in der Bachelorarbeit in einer Literaturrecherche die Eigenschaften der Ausgangsbetone Infraleichtbeton, konstruktiver Leichtbeton und haufwerksporiger Leichtbeton ausgearbeitet. Die Besonderheiten und Herausforderungen von Leichtbetonen im Vergleich zu Normalbeton entstehen durch den teilweisen oder vollständigen Ersatz der normalen Gesteinskörnung durch leichte Gesteinskörnung. Aufgrund ihrer Porigkeit können leichte Gesteinskörnungen eine hohe Wasseraufnahme aufweisen. Diese Wasseraufnahme muss bei der Herstellung von Beton berücksichtigt werden [3]. Auch im Zustand des Festbetons unterscheiden sich Leichtbeton und Normalbeton durch die Porigkeit sowohl hinsichtlich ihres Gefüges als auch ihres Tragverhaltens. Leichtbeton mit geeigneter Zusammensetzung weist im Gegensatz zu Normalbeton keine Verbundzone auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die poröse Gesteinskörnung während des Mischvorgangs Teile des Anmachwassers aufnimmt. Mit diesem Wasser gelangen Anteile des Bindemittels in die leichte Gesteinskörnung, sodass Hydratationsprodukte nicht nur an der Kornoberfläche, sondern auch innerhalb der Körner ausgebildet werden [4].

Des Weiteren wurde das Recycling von Beton unter Berücksichtigung aktueller Standards (DIN 1045-2 [5]) betrachtet. In einer Gegenüberstellung von rezykliertem ILC und rezykliertem Normalbeton wurden die spezifischen Herausforderungen bei der Wiederverwendung von Leichtbeton systematisch analysiert. Die Literatur [6] zeigt, dass aufgrund der unterschiedlichen Gefügestrukturen weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich rezyklierter Leichtbetone besteht, da diese bislang in den geltenden Normen nicht berücksichtigt werden.

## Materialien, Methoden und Versuchsprogramm

Für die Bestimmung des Festigkeitspotentials von Rezyklaten aus Leichtbeton wurden folgende Ausgangsbetone verwendet (Abb. 1):

- LC (konstruktiver Leichtbeton)
- LAC (haufwerksporiger Leichtbeton)
- ILC (Infraleichtbeton)

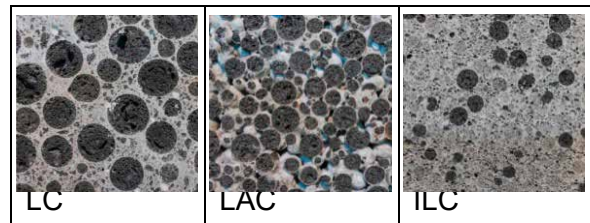


Abb. 1: repräsentative Leichtbetone und deren typisches Gefüge [13]

Jeder Ausgangsbeton wurde dabei in der Kornfraktion 5/8 und 8/16 untersucht, sodass sich insgesamt sechs zu untersuchende Rezyklatfraktionen ergaben. Die Rezyklate werden im Folgenden als **rLC** (rezyklierter LC), **rLAC** (rezyklierter LAC) und **rILC** (rezyklierter ILC) bezeichnet.

Die Untersuchung der Rezyklate erfolgte gemäß dem Versuchsprogramm (Abb. ) sowohl auf Kornebene als auch im Betonverbund. Die aus den Rezyklaten hergestellten Betone werden entsprechend als **C\_rLC**, **C\_rLAC** und **C\_rILC** benannt. Es wurden folgende Methoden angewandt: Kornfestigkeit (DIN EN 13055 [1]) und Wasseraufnahme (DIN EN 1097-6 [7]) am Korn; Verdichtungsmaß (DIN EN 12350-04 [8]), Frischbetonrohddichte (DIN EN 12350-6 [9]) am Frischbeton; Druckfestigkeit (DIN EN 12390-3 [10]), E-Modul (DIN EN 12390-13 [11]) und

Trockenrohdichte (DIN EN 12390-7 [12]) am Festbeton.

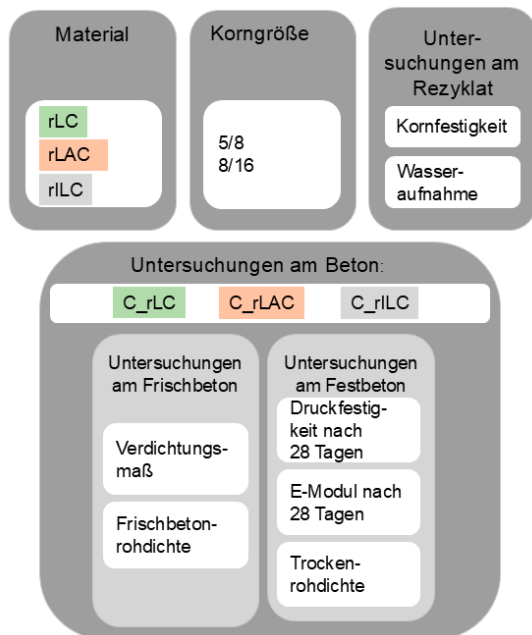


Abb. 2: Versuchsprogramm zum Ablauf der Prüfungen an Rezyklat, Frischbeton und Festbeton

## Auswirkungen der Rezyklateigenschaften

In den Ergebnissen wurden unter anderem die unterschiedliche Gefügestruktur und Kornform der verwendeten Rezyklate charakterisiert. rILC enthält mehr Blähglas als Blähton und hat eine geschäumte Zementmatrix. Die Rezyklatfraktion rLC hat eine dichte Zementmatrix und es wurde als Gesteinskörnung Blähton und Sand verwendet. Die Rezyklate von rLAC bestehen aus Blähton, welcher nur punktuell durch eine Zementmatrix verbunden ist. Man sieht eine haufwerksporige Struktur und es ist ein erhöhter Anteil an kugelförmiger Kornform vorhanden.

Diese Erkenntnisse lieferten in der Diskussion Erklärungsansätze für Abweichungen in der Korrelation zwischen Verdichtungsmaß und Wasseraufnahme (Abb. 3) der Fraktion 5/8. Die Fraktion 8/16 korreliert sehr gut. Mit steigender Wasseraufnahme nach 24 h sinkt das Verdichtungsmaß, da die Rezyklate dem Frischbeton vermehrt Wasser entziehen und dieser dadurch steifer wird. Für die Fraktion 5/8 existiert keine Korrelation, da das

Verdichtungsmaß der untersuchten rezyklierten Leichtbetone nahezu identisch ist während sich die Wasseraufnahme der Körner stark unterscheidet.

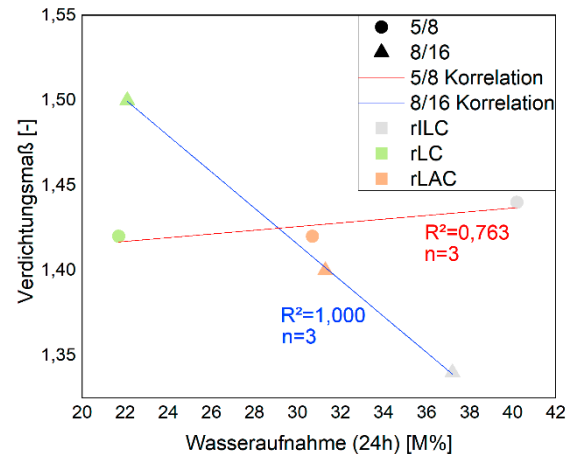


Abb. 3: Korrelation Verdichtungsmaß mit Wasseraufnahme

Ein möglicher Grund hierfür ist, dass der kurze Zeitraum der Wasseraufnahme zwischen Wasserzugabe und Messung des Verdichtungsmaßes bei der Fraktion 5/8 aufgrund der ähnlicher Oberflächenporigkeit der Rezyklate vergleichbar ist, die durch einen hohen Anteil an Bruchstellen der leichten Gesteinskörnung verursacht wird. Bei der Fraktion 8/16 unterscheiden sich die Oberflächenporigkeiten der Rezyklatgruppen deutlich, wodurch die Wasseraufnahme nach 24 h einen stärkeren Einfluss auf das Verdichtungsmaß ausübt.

Die Gefügestruktur und Kornform hat ebenfalls einen Einfluss auf die Korrelation zwischen Kornfestigkeit und Kornrohdichte. Da das Lastabtragungsverhalten bei der Bestimmung der Kornfestigkeit durch die poröse Gefügestruktur sowie kugelförmige Kornformen beeinflusst wird, wirken sich diese Eigenschaften auf die ermittelte Kornfestigkeit aus.

Auf Grundlage der Prüfungen des Verdichtungsmaßes, der Wasseraufnahme nach 24 h und der Ergiebigkeit konnte abgeleitet werden, dass eine höhere Berücksichtigung des Saugwassers sinnvoll erscheint, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern.

## Vergleich normativer Prüfverfahren zur Festigkeitsbewertung

Zur Bewertung des Festigkeitspotentials wurden sowohl die Kornfestigkeit nach DIN EN 13055 [1] als auch ein Prüfverfahren für leichte Gesteinskörnung im Leichtbeton nach DIN 4226-3 [2] untersucht. Beide Methoden sind ursprünglich für unterschiedliche Prüfziele bei leichten Gesteinskörnungen vorgesehen. Die Anwendung der Kornfestigkeit wird in DIN EN 13055, Abschnitt 5.10 [1] in zwei Anmerkungen beschrieben:

- Zwischen der Kornfestigkeit der leichten Gesteinskörnung und den Eigenschaften bei deren Endanwendung besteht keine allgemein gültige Beziehung;
- Die Kornfestigkeit ist ausschließlich für die werkseigene Produktionskontrolle und die Qualitätsdokumentation vorgesehen.

Diese Anmerkungen verdeutlichen, dass aus der Kornfestigkeit keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Endanwendung, wie etwa Druckfestigkeit, Tragfähigkeit oder Elastizitätsmodul des Betons, gezogen werden können und dass sie ausschließlich der Kontrolle der Gleichmäßigkeit innerhalb der Produktion dient. Mit dem Prüfverfahren nach DIN 4226-3 Abschnitt 7.1 [2] werden die Auswirkungen von Schwankungen der Kornfestigkeit und der Kornrohdichte leichter Gesteinskörnungen auf die Druckfestigkeit sowie die Rohdichte des Betons untersucht. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der untersuchten Gesteinskörnungen wird der Beton einheitlich nach einer festgelegten Rezeptur hergestellt, in diesem Fall gemäß DIN 4226-3, Abschnitt 7.1.2 [2].

Es zeigte sich, dass es sich um zwei unterschiedliche Prüfverfahren handelt, zwischen denen keine direkte Korrelation besteht. Während sich das Verfahren nach DIN EN 13055 [1] für den Vergleich verschiedener Rezyklate eignet, ist die Prüfung gemäß DIN 4226-3 [2] besser geeignet,

um das Festigkeitspotential im Beton zu bewerten.

## Gegenüberstellung geprüfter und berechneter E-Modul

Beim Vergleich der experimentell ermittelten und berechneten Elastizitätsmodule wurde zudem festgestellt, dass die Berechnung nach DIN EN 1992-1-1 [14] höhere Werte liefert als die experimentelle Bestimmung. Dies liegt daran, dass bei den Recyclingleichtbetonen das verwendete Rezyklat maßgebend für die Grenzfestigkeit ist und einen Einfluss auf den E-Modul hat. Der berechnete E-Modul ist unterschiedlich zu dem geprüften E-Modul, da der berechnete E-Modul auf eine leichte Gesteinskörnung ohne Rückstände von recyceltem Zementstein zurückzuführen ist. Reine Blähtonkörner haben eine höhere Steifigkeit als die Rezyklate rLC und rLC. Dies liegt daran, dass Blähtonkörner nicht verformungsfähig sind, sondern spröde brechen. Der Zementstein hingegen kann eine geringe Verformung aufnehmen und ist dadurch weicher. Dies führt zu einem geringeren E-Modul bei den Betonen.

## Fazit und Ausblick

Für die Baupraxis ergibt sich, dass die Berücksichtigung des Saugwassers weiter optimiert werden sollte, um eine bessere Verarbeitbarkeit von Recyclingleichtbetonen zu erreichen. Zudem besteht Forschungsbedarf hinsichtlich geeigneter Methoden zur Bestimmung der Kornrohdichte stark offenerporiger Rezyklate wie rLC 5/8.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1] DIN EN 13055, „Leichte Gesteinskörnungen (Lightweight aggregates)“, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Germany, 2016.
- [2] DIN 4226-3, „Zuschlag für Beton - Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge (Aggregates for concrete; testing of aggregate of compact or porous structure)“, Apr. 1983.
- [3] G. Neroth, Hrsg., *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlage-Baustoffe-Oberflächenschutz*, 27., Vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [4] K.-C. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thienel, „Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton“. Universität der Bundeswehr München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Wintersemester 2018.
- [5] DIN 1045-2, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete)*, Berlin, Germany., August 2023. doi: 10.31030/3445766.
- [6] T. Haller, S. Scherb, N. Beuntner, und K.-C. Thienel, „Renewable construction with lightweight concrete – Reclaimed recycled material systems with CO<sub>2</sub>-absorption“, *Construction and Building Materials*, Bd. 466, S. 140339, März 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140339.
- [7] DIN EN 1097-6, „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption“, Beuth Verlag, Berlin, Germany, Mai 2022.
- [8] DIN EN 12350-4, „Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß (Testing fresh concrete – Part 4: Degree of compactability)“, Beuth-Verlag, Berlin, Germany, 2019.
- [9] DIN EN 12350-6, „Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte“, Beuth-Verlag, Berlin, Germany, 2011.
- [10] DIN EN 12390-3, „Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens)“, Beuth-Verlag, Berlin, Okt. 2019.
- [11] DIN EN 12390-13, „Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul) (Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression)“, Beuth-Verlag, Berlin, 2021.
- [12] DIN EN 12390-7, „Prüfung von Festbeton - Teil 7: Rohdichte von Festbeton + AC: 2020 (Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete)“, Beuth-Verlag, Berlin, Germany, Jan. 2021.
- [13] K.-C. Thienel, „Projekt Description: Building to building to building to binder (Bn)“. 30. Oktober 2023.
- [14] DIN EN 1992-1-1, „Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“, 2011.

**Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:** Siehe „Im Text zitierte Quellen“

### Autor, Coautoren

Barbara Hölzl, Studentin des Bauingenieurwesens von 10/2022 bis 03/2026 an der Hochschule München, Bachelor of Engineering

### Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Hochschule München (HM) in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München (UniBwM), wo die Versuche durchgeführt wurden.

Betreuer waren Dr.-Ing. Nancy Beuntner und Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel (UniBwM) und Prof. Dr.-Ing. Ricarda Sposito (HM).

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# ANALYSE UND BEWERTUNG DER KLIMA(WANDEL)PERFORMANZ VON NEUBAUPROJEKTEN VON WOHNUNGSBAUUNTERNEHMEN IN MÜNCHEN

## Masterarbeit

*Katrin Niedermeier*

**Diese Masterarbeit untersucht, ob heutige Neubauten von Wohnungsbauunternehmen in München unter zukünftigen Klimabedingungen weiterhin ein behagliches Innenklima gewährleisten können. Dafür werden drei repräsentative Neubauprojekte mithilfe thermisch-energetischer Gebäudesimulation analysiert und sowohl mit aktuellen Klimadaten als auch mit Klimaszenarien für die Jahre 2050 und 2100 bewertet. Als Kennzahl dient dabei die Klima(wandel)performanz (KLP) [1], die den Anteil der Zeit beschreibt, in der ohne aktive Gebäudetechnik ein behagliches Innenraumklima erreicht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Planung auf Basis heutiger Klimadaten für zukünftige Klimabedingungen nicht ausreichend ist. Gleichzeitig wird deutlich, dass durch gezielte passive Maßnahmen, wie etwa Verschattung, angepasste Fensterflächen oder optimierte Gebäudehüllen, die KLP deutlich verbessert werden kann.**

**Keywords:** Klimawandel, Klimaanpassung, Überhitzung, Thermische Simulation, Neubauten

## Einleitung

Wohnungsunternehmen in München müssen dringend bezahlbaren Wohnraum schaffen und gleichzeitig den steigenden Anforderungen des Klimawandels gerecht werden. Mit einer Leerstandsquote von nur 0,7 % und Mieten über 20 € pro m<sup>2</sup> [2,3] zählt München zu den angespanntesten Wohnungsmärkten Deutschlands. Gleichzeitig führt der Klimawandel zu einer zunehmenden Anzahl extremer Hitzetage und damit das Überhitzungsrisiko in Innenräumen, was das Planen und Bauen vor weitere Herausforderungen stellt.

Da der Lebenszyklus von Neubauten zu einem großen Teil in der Zukunft liegt, müssen heute errichtete Gebäude bereits auf die künftig zu erwartenden klimatischen Rahmenbedingungen ausgelegt werden. Vor diesem Hintergrund untersucht die Arbeit, wie sich Neubauten Münchner Wohnungsunternehmen unter den Bedingungen des Klimawandels verhalten. Als Bewertungsgröße wird die KLP nach Mayer [1] verwendet. Konkret werden drei repräsentative Neubauprojekte analysiert und der Einfluss passiver Anpassungsmaßnahmen auf die Klimaanpassungsfähigkeit untersucht.

## Gebäude

Das 2019 fertiggestellte sechsgeschossige Wohngebäude WA 14 West im *Prinz-Eugen-Park* wurde in Holz-Hybrid-Bauweise errichtet und ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Geschosse bestehen aus vorgefertigten Holzrahmenelementen mit Holz-Beton-Verbunddecken. Das Gebäude wurde von Rapp Architekten geplant. [4]



Abb. 1: Prinz-Eugen Park (Bild: pro:Holz [5])

Das 2021 fertiggestellte Projekt *Freihampton* ist in Abbildung 2 dargestellt und liegt im Stadtteil Freiham. Es besteht aus zwei fünfgeschossigen Gebäuden in Holzständerbauweise mit tragender Kalksandstein- und Stahlbetonstruktur sowie Holzständeraußenwänden. Die Planung erfolgte durch die Klumpe Architekten. [6]



Abb. 2: Freihampton (Bild: Klumpe Architekten [7])

Abbildung 3 zeigt das fünfgeschossige Wohngebäude *San Riemo* der Architekturbüros Summacumfemmer und Juliane Greb in der Messestadt Riem, das im Jahr 2020 fertiggestellt wurde. Es besteht aus einem tragenden Betonskelett mit nichttragenden Holzständerwänden in Trockenbauweise sowie einer vorgehängten Fassade aus transluzenten Lichtwellplatten. [8]



Abb. 3: San Riemo (Bild: BauNetz [8])

## Methodik

Für die Untersuchung werden im thermisch-energetischen Simulationsprogramm IDA ICE digitale Gebäudemodelle erstellt. Die Simulationsrandbedingungen werden auf Grundlage geltender Normen definiert. Für die drei Gebäude werden Simulationen unter sieben verschiedenen Klimaszenarien durchgeführt: dem aktuellen Testreferenzjahr TRY2015 sowie den IPCC-Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 für die Jahre 2050 und 2100.

Die Auswertung erfolgt anhand der Bewertungsmethodik nach Mayer [1], wobei die KLP als prozentualer Anteil der jährlichen Nutzungszeit definiert ist, in dem ohne aktive Gebäudetechnik ein behagliches Innenraumklima erreicht wird. Ergänzend werden Über- und Untertemperaturgradstunden (ÜTG bzw. UTG) ausgewertet, welche die zeitgewichtete Abweichung der operativen Innenraumtemperatur von den adaptiven Komfortgrenzen nach DIN EN 16798-1:2022-03 [9] bzw. ASHRAE Standard 55-2020 [10] in Abbildung 4 erfassen.

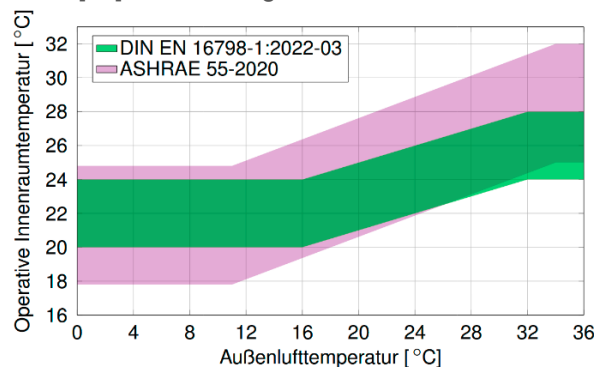


Abb. 4: Komfortbereiche im adaptiven Modell nach DIN EN 16798-1:2022-03 und ASHRAE Standard 55-2020

Auf Basis der Simulationsergebnisse werden Anpassungsmaßnahmen entwickelt, deren Wirksamkeit in einer zweiten Simulationsphase analysiert wird. Die drei Klimaanpassungsmaßnahmen umfassen automatisierte Verschattungseinrichtungen mit Aktivierung ab  $\geq 200 \text{ W/m}^2$  Sonneneinstrahlung, verstärkte natürliche Lüftung mit Fensteröffnung bereits ab  $21^\circ\text{C}$  statt  $23^\circ\text{C}$  sowie verringerte Fensterflächenanteile durch Rückkehr zu klassischen Lochfassaden mit regelmäßig verteilten Fenstern statt durchgehender Vollverglasung und bodentiefer Fenster.

## Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation sowie der anschließenden Auswertung in Matlab zur Berechnung der KLP dargestellt. Zunächst wurden die Unterschiede zwischen der DIN EN 16798-1:2022-03 und dem ASHRAE Standard 55-2020 herausgearbeitet. Da die DIN-Norm als maßgebliche europäische Referenz mit strengeren Grenzwerten dem Vorsorgeprinzip bei Klimaanpassungsmaßnahmen entspricht, dient sie der weiteren Bewertung, während die ASHRAE-Werte lediglich informativ ergänzen. Die drei Gebäude wurden zu Beginn hinsichtlich ihrer KLP nach DIN EN 16798-1:2022-03 mit den TRY2015-Daten analysiert. Die KLP-Mittelwerte des Gegenwartsszenarios TRY2015 sind in Abbildung 5 dargestellt. Im Sommer zeigt sich keine Überhitzung, mit KLP-Werten von 97 bis 100 %. Im Winter fallen die KLP-Werte hingegen auf bis zu 0 % ab. März und November zeigen sich mit Werten von rund 30 % als Übergangsmonate und markieren damit den graduellen Übergang zwischen Heiz- und Kühlperiode.

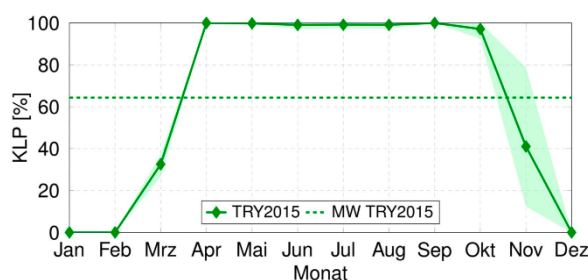


Abb. 5: Monatliche KLP-Mittelwerte des TRY2015

Abbildung 6 zeigt die monatlichen KLP-Mittelwerte der drei RCP-Szenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) im Jahr 2050. Im Sommer sinken die KLP-Werte mit zunehmendem Klimawandelszenario ( $\text{RCP2.6} > \text{RCP4.5} > \text{RCP8.5}$ ) durch Überhitzungsrisiken, während sie im Winter umgekehrt ansteigen. RCP8.5 erreicht mit +8 bis +10 % die höchsten Jahresmittelwerte. Die Übergangsmonate erreichen nahezu 100 % KLP, was eine gute klimatische Anpassung der Gebäude in diesem Zeitraum bedeutet.

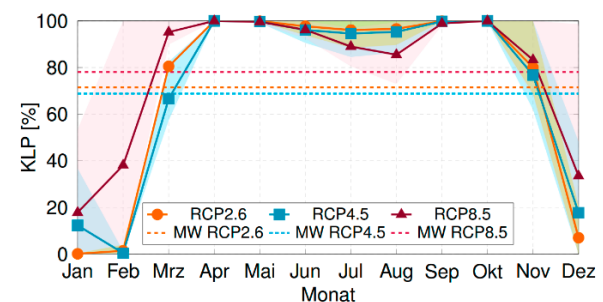


Abb. 6: Monatliche KLP-Mittelwerte der drei RCP-Szenarien im Jahr 2050

Abbildung 7 zeigt die monatlichen KLP-Mittelwerte der drei RCP-Szenarien im Jahr 2100. Die KLP im Sommer sinkt mit zunehmendem Klimawandel ( $\text{RCP2.6} > \text{RCP4.5} > \text{RCP8.5}$ ) durch stärkere Überhitzung. Die KLP im Winter steigt umgekehrt. RCP8.5 erreicht die höchsten Jahresmittel mit +13 % zu RCP2.6. Die Übergangsmonate erreichen nahezu 100 %, während Überhitzung im Sommer das kritischste Risiko bleibt.

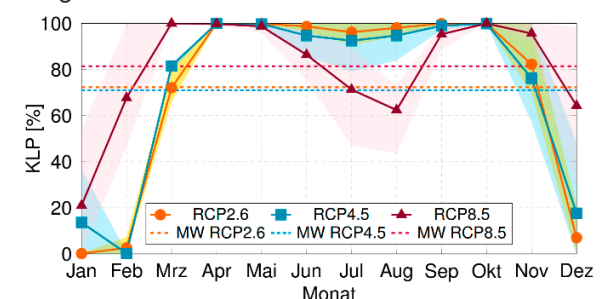


Abb. 7: Monatliche KLP-Mittelwerte der drei RCP-Szenarien im Jahr 2100

Anschließend wurden die Einflüsse der drei gewählten passiven Anpassungsmaßnahmen (Automatisierte Verschattung, erhöhte natürliche Lüftung, verringerter Fensterflächenanteil) untersucht. Da sich die Sommerperiode als kritischer Zeitraum für Überhitzung zeigt, wird im Folgenden der Zeitraum von April bis Oktober betrachtet.

In Tabelle 1 sind die durchschnittlichen über alle drei Gebäude gemittelten Verbesserungen der KLP in der Sommerperiode durch die angewendeten Maßnahmen dargestellt. Die gebäudespezifischen Unterschiede werden in der vollständigen Arbeit detailliert dargestellt.

Tab. 1: Durchschnittliche Verbesserungen der KLP [%] durch Maßnahmen in der Sommerperiode

| Maßnahme                                      | $\bar{\Delta}$ KLP [%] |
|-----------------------------------------------|------------------------|
| Maßnahme A: Automatisierte Verschattung       | 0,9                    |
| Maßnahme B: Verstärkte natürliche Lüftung     | -0,2                   |
| Maßnahme C: Verringerter Fensterflächenanteil | 0,7                    |

Automatisierte Verschattung und verstärkte natürliche Lüftung zeigen eine Verbesserung der KLP. Es fällt die negative KLP bei Maßnahme B auf, die sich durch eine exemplarische Analyse der UTG und ÜTG bei San Riemo erklären lässt (siehe Abbildung 8). Die Fensteröffnung ab 21 °C kühlt an kühleren Sommertagen die Innenräume unter die Komfortuntergrenze von 24 °C ab (siehe Abbildung 4). Die Maßnahme bleibt demnach trotz dieses Effekts wirksam, da sie primär sommerliche Überhitzung verhindert. Erst im Jahr 2100 treten bei RCP8.5 ÜTG und somit Überhitzung auf.

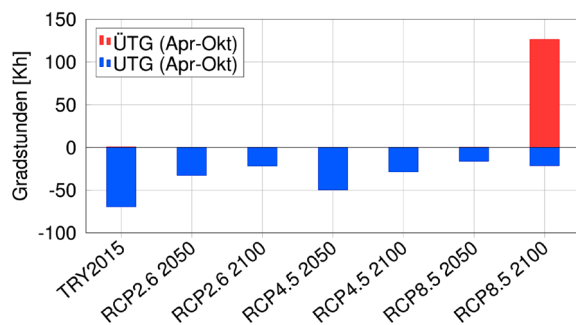


Abb. 8: ÜTG und UTG in der Sommerperiode für San Riemo bei erhöhter natürlicher Lüftung

## Fazit

Die Untersuchung der KLP verdeutlicht eine fortschreitende Veränderung des thermischen Komforts infolge des Klimawandels. Während im Referenzklima TRY2015 in den Wintermonaten durchgehend kein thermischer Komfort erreicht wird, zeigen sich bereits im Ausgangszustand erste Anzeichen sommerlicher Überhitzung. Mit zunehmender Betrachtung zukünftiger

Klimaszenarien der Jahre 2050 und 2100 steigt die KLP in den Wintermonaten szenarioabhängig an, was auf eine wachsende Zahl komfortabler Stunden ohne aktive Beheizung und einen insgesamt sinkenden Heizbedarf im Winter hinweist.

Damit einhergehend verschärfen sich die Überhitzungsprobleme in den Sommermonaten deutlich. In allen untersuchten Gebäuden tritt spätestens ab 2050 in den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 Überhitzung auf, die sich bis 2100 weiter intensiviert. Obwohl der Jahresmittelwert der KLP aufgrund milderer Winter ansteigt, verdeckt dieser gemittelte Kennwert die zunehmenden sommerlichen Komfortdefizite.

Die Wirksamkeit passiver Anpassungsmaßnahmen ist deutlich vom jeweiligen Gebäudetyp abhängig. Insgesamt zeigen automatisierte Verschattungssysteme sowie eine Reduzierung des Fensterflächenanteils positive Effekte auf die KLP. Die verstärkte natürliche Lüftung weist zwar eine geringfügig negative Veränderung der KLP auf, erweist sich jedoch zugleich als wirksames Instrument zur Überhitzungsprävention. Die beobachtete negative Veränderung der KLP resultiert nicht aus erhöhten Überhitzungsrisiken, sondern aus temporären Unterschreitungen der unteren adaptiven Komfortgrenze gemäß DIN EN 16798-1:2022.

Diese Ergebnisse werfen grundsätzliche Fragen hinsichtlich der Angemessenheit der normativen Komfortgrenzen auf. Insbesondere ist zu diskutieren, ob kurzzeitige Unterschreitungen der unteren Komfortgrenze in den Sommermonaten oder bei nächtlicher Lüftung, nicht als akzeptabel oder sogar komfortfördernd zu bewerten sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Planung auf Basis heutiger Klimadaten künftig nicht mehr ausreicht. Aufgrund zunehmender sommerlicher Überhitzung und milderer Winter ist es erforderlich, zukünftige Klimaszenarien systematisch in Normung und Planung zu integrieren, um den langfristigen thermischen Komfort und den gezielten und effizienten Einsatz von Kühl- und Heiztechnik in Wohngebäuden sicherzustellen.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Mayer, A. (2022): Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Klima- und Kulturperformanz von Gebäuden unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Dissertation. Technische Universität München.
- [2]: Süddeutsche Zeitung (März 2025): Kreise im sozialen Wohnungsbau – München.
- [3]: Süddeutsche Zeitung (Juli 2025): Immobilienpreise in München steigen wieder an.
- [4]: Djahanschah, S.; Hafner, A.; und Seidel, A. (2020): Ökologische Mustersiedlung Prinz-Eugen-Park in München. Informationsdienst Holz. [https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/9\\_Dokumentationen/Baudokumentation\\_Prinz-Eugen-Park\\_2020.pdf](https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/9_Dokumentationen/Baudokumentation_Prinz-Eugen-Park_2020.pdf).
- [5]: pro:Holz (2021): Ökologische Mustersiedlung Prinz-Eugen-Park – Baufeld WA 14 West. <https://www.proholz.at/holzbauten/architektur/oekologische-mustersiedlung-muenchen-baufeld-wa-14-west>.
- [6]: Kooperative Grossstadt (2022): FREIHAMPTON. <https://kooperative-grossstadt.de/freihampton/>.
- [7]: Klumpe Architekten (2022). Freihampton - Projektdokumentation.
- [8]: BauNetz (2021). Wohnen im Schaltraum von San Riemo – Summacumfemmer und Buro Juliane Greb in München. [https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Summacumfemmer\\_und\\_Buero\\_Juliane\\_Greb\\_in\\_Muenchen\\_7634559.html](https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Summacumfemmer_und_Buero_Juliane_Greb_in_Muenchen_7634559.html)
- [9]: DIN EN 16798-1:2022-03 (2022) Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Raumklima. Berlin.
- [10]: ASHRAE (2020): ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 – Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quelle:

1. Mayer, Anica (2022). „Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Klima- und Kulturperformanz von Gebäuden unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit“. Dissertation. Technische Universität München, TUM School of Engineering und Design.

## Autorin

Katrin Niedermeier

### Studium:

|                   |                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| 04/2023 – 10/2025 | M. Sc. Bauingenieurwesen, Technische Universität München    |
| 10/2019 – 03/2023 | B. Sc. Umweltingenieurwesen, Technische Universität München |

### Beruf:

|                   |                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| 04/2024 – 03/2026 | Werkstudentin Bauphysik, bauart – Beratende Ingenieure      |
| 04/2022 – 10/2023 | Werkstudentin Nachhaltiges Bauen, Intep – Integrale Planung |
| 05/2022 – 09/2022 | Werkstudentin Bauphysik, Fraunhofer Institut für Bauphysik  |
| 10/2020 – 10/2022 | Werkstudentin, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dieter Schreff        |

## Betreuende

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauphysik, TU München, School of Engineering and Design, Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, Betreuende: Dr.-Ing. Anica Mayer und M. Sc. Josef Eichinger

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# LLM-GESTÜTZTE BRÜCKENPLANUNG: RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION ZUR INTEGRATION DEUTSCHER BAUVORSCHRIFTEN

## Masterarbeit

*Diana Oberschmid*

In dieser Masterarbeit wird ein Ansatz zur Anwendung von Large Language Models (LLMs) im Kontext der Brückenplanung entwickelt. Die starke Regulierung im Bauwesen geht mit einem hohem, fehleranfälligen Anwendungsprozess einher. Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Bereitstellung eines zuverlässigen und überprüfbaren LLM-basierten Systems zur Verarbeitung von Brückenbaunormen unter Berücksichtigung der typischen Einschränkungen allgemeiner LLMs, um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren sowie die Effizienz in der Arbeit mit Normen zu steigern.

Methodisch basiert der Ansatz auf Retrieval-Augmented Generation (RAG), wobei eine externe Wissensdatenbank mit vier relevanten Brückennormen in den Antwortgenerierungsprozess integriert wird. Die Validierung erfolgt durch die Implementierung eines Chatbots, die fachspezifischen Fragen beantwortet und die zugrunde liegenden Normstellen als Zitate ausgibt. Die Evaluation stützt sich auf manuell erstellte Benchmarks mit unterschiedlichen Fragetypen. Die Ergebnisse zeigen eine Genauigkeit von 65 % und damit eine um 25 Prozentpunkte höhere Leistungsfähigkeit gegenüber einem allgemeinen ChatGPT-Modell. Zusätzlich bestätigt die Robustheitsanalyse ein kontrolliertes Antwortverhalten bei nicht abgedeckten Fragestellungen. Die Arbeit zeigt, dass RAG-basierte LLM-Systeme ein geeignetes methodisches Fundament für den Einsatz in regulierten Ingenieurdomänen darstellen und Potenzial für weiterführende Anwendungen in der normbasierten Brückenplanung bieten.

**Keywords:** Large Language Model, Retrieval Augmented Generation, Brückenbaunormen, agentenbasierte Künstliche Intelligenz, domänenspezifisches Wissen

## Motivation

Die vorliegende Masterarbeit untersucht, wie Large Language Models (LLM) mithilfe eines Retrieval-Augmented-Generation-Ansatzes (RAG) zur zuverlässigen und verifizierbaren Verarbeitung von Brückenbaunormen eingesetzt werden

können. Angesichts des geringen Digitalisierungsgrades im Bauwesen [1], und der hoher Regulierungsdichte [2], ergibt sich ein deutliches Optimierungspotenzial für die Unterstützung im Umgang mit umfangreichen Normenwerken. Ingenieurinnen und Ingenieure sind in der täglichen Praxis mit einem enormen Aufwand konfrontiert,

wenn relevante Regelungen manuell gefiltert, interpretiert und korrekt angewendet werden müssen. Zugleich sind im Bauwesen normative Vorgaben rechtlich verbindlich, was die Nachvollziehbarkeit und Prüfbarkeit jeder Entscheidung essenziell macht. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung eines zuverlässigen, transparent arbeitenden Systems, das normbasierte Auskünfte inklusive eindeutiger Quellenangaben liefert, von hoher praktischer Relevanz.

## Theoretischer Hintergrund

Der theoretische Rahmen der Arbeit umfasst grundlegende Konzepte künstlicher Intelligenz, von maschinellem Lernen über neuronale Netze bis hin zu Deep Learning und Natural Language Processing und die damit einhergehende Entwicklung großer Sprachmodelle, um die zugrunde liegende Technologien für das verwendete System darzulegen. LLMs als moderne, auf Transformer-Architekturen basierende Sprachmodelle zeichnen sich durch hohes generatives Potenzial aus, weisen jedoch Einschränkungen auf. Besonders gravierend sind sogenannte Halluzinationen [3], also plausibel klingende, aber sachlich falsche Antworten, sowie der Umstand, dass das interne Wissen eines LLM weder aktuell gehalten noch domänenspezifisch modifiziert werden kann, ohne das Modell neu zu trainieren. Hinzu kommt der hohe Kostenaufwand, welcher mit dem Training neuer fachspezifischer Daten einhergeht. Um die Verlässlichkeit und Verifizierbarkeit der Antworten im Normenkontext zu erreichen, kann eine Anpassung von LLMs vorgenommen

werden, welche diese Herausforderungen adressieren. Während Fine Tuning spezifisches Wissen auf ein allgemeines Sprachmodell trainiert [4], nutzt Prompt Engineering eine iterative Anpassung der Fragestellung und Anweisung, um die gewünschte Antwort zu generieren [5]. Als dritte Methode steht RAG zur Erweiterung der Wissensbasis zur Verfügung, welche im Rahmen der Arbeit zur Anwendung kommt.

## Methodik

Zur Entwicklung und Abgrenzung der Notwendigkeit im Vergleich zu allgemeinen Sprachmodellen wurden zunächst erste Voruntersuchungen durchgeführt. Diese zeigten, dass LLMs zwar teilweise brauchbare Ergebnisse liefern können, jedoch keine verlässliche Grundlage für eine professionelle Anwendung darstellen. Insbesondere fehlte eine Möglichkeit zur nachvollziehbaren Quellenangabe. Nach dem Vergleich von Prompt Engineering, Fine-Tuning und RAG erwies sich der RAG-Ansatz als am besten geeignet, da er domänenspezifische Wissensintegration ohne kostspieliges Nachtrainieren ermöglicht und gleichzeitig die Transparenz der Antworten sicherstellt.

RAG beschreibt einen Ansatz, indem externe Wissensquellen während der Antwortgenerierung eingebunden werden. Dieser ist in drei Abschnitte gegliedert (sh. Abb. 1). Der erste Schritt beschreibt die Verarbeitung der Wissensdatenbank zu einzelnen Embeddings, welche in diesem Kontext Vektoren gleichgesetzt sind, sowie die anschließende Speicherung in einer Vektordatenbank.

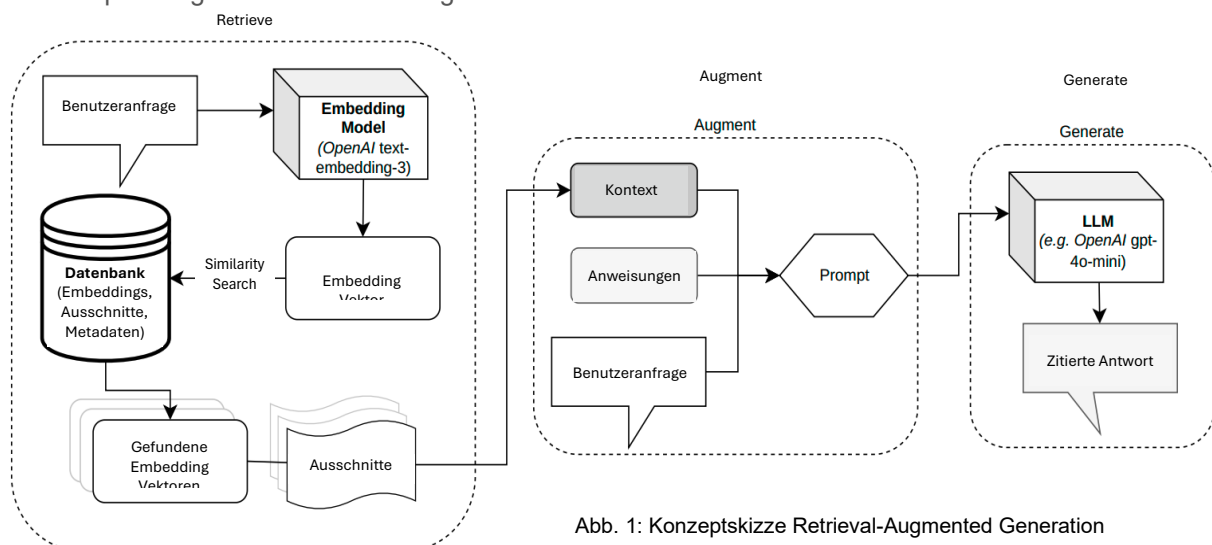


Abb. 1: Konzeptskizze Retrieval-Augmented Generation

Hierdurch kann fachspezifisches Wissen für Maschinen nutzbar gemacht werden sowie die Aktualität der Datengesteuert werden. Die Anfrage des Benutzers wird zur Abfrage dieser Datenbank zunächst in einen semantischen Vektorraum eingebettet. Mithilfe der sogenannten Similarity Search, zu Deutsch Ähnlichkeitsabgleich, wird die Nutzeranfrage mit der vektorisierten Wissensbasis abgeglichen. Die dabei gefundenen relevanten Textpassagen dienen anschließend als Kontext für das LLM. Sie werden im zweiten Schritt gemeinsam mit der Frage und einem Prompt als Instruktion zusammengefasst und zur Antwortgenerierung an das Sprachmodell weitergegeben. Im letzten Schritt erzeugt das LLM seine Antwort und gibt die genutzten Quellen explizit an. Auf diese Weise können sowohl Halluzinationen reduziert als auch die Verifizierbarkeit gewährleistet werden, da sich die Antwort ausschließlich auf die Wissensdatenbank beziehen und der entsprechende Auszug angegeben ist [6].

Als Wissensbasis dienten vier zentrale, in Deutschland relevante Regelwerke des Brückenbaus: Eurocode 2, Teil 2, die ZTV-ING, die RE-ING sowie die RAB-ING. Diese Dokumente decken wesentliche Teile des Entwurfs-, Bemessungs- und Planungsprozesses ab und bilden eine realistische Grundlage für die spätere Anwendung im Ingenieurbüro.

Die Implementierung erfolgte in Python unter Verwendung der LangChain-Umgebung, das modulare Komponenten für Dokumentenverarbeitung, Kosinus-Ähnlichkeitsabgleich, Prompting und LLM-Integration bereitstellt.

Das System ist in zwei Stufen unterteilt. In der Vorverarbeitung der Daten werden die PDF-Dokumente eingelesen und mit Hilfe eines Text-Splitters in logisch zusammenhängende Textabschnitte zerlegt und mit dem Embedding-Modell „text-embedding-3-large“ (vgl. Abb. 1) von Open AI vektorisiert. ChromaDB fungierte als persistente Vektordatenbank, die später für die semantische Suche genutzt wird. Der eigentliche Frage-und-Antwort-Prozess wird in einem Abfrage-Modul eingebaut. Dabei wird die Nutzereingaben verarbeitet, passende Normstellen sucht, die Antwort generiert und mitsamt zitierten Textstellen ausgibt.

Die Trennung gewährleistet Effizienz, da das kosten- und zeitintensive Embedding nur einmal durchgeführt werden muss.

Zur Evaluation wurde ein eigener Benchmark entwickelt, da im Bereich des deutschsprachigen Brückenbaus bisher keine standardisierten Tests zur Bewertung von LLM- oder RAG-Systemen existieren. Dieser umfasst ein Set an Testfragen, welches 35 Fragen unterschiedlicher Typen inkludiert. Die Fragen zielen auf textbasierte, tabellenbasierte, grafikbezogene, normenübergreifende sowie Informationen ohne Bezug zur Wissensbasis ab. Bewertet werden sowohl die Korrektheit der Antworten als auch die Vollständigkeit der Quellenangaben basierend auf den im Benchmark vorgegeben Antwort.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte System in der Lage ist, die Mehrheit der domänen-spezifischen Fragen korrekt zu beantworten. Bei der Nutzung aller vier Normen erreichte das System (vgl. Abb.2), 65 % korrekte Antworten, ergänzt durch rund 20 % teilweise korrekte Antworten. Der Anteil vollständig falscher Antworten lag in der besten Konfiguration bei 15 %. Besonders positiv hervorzuheben ist, dass das System ro-

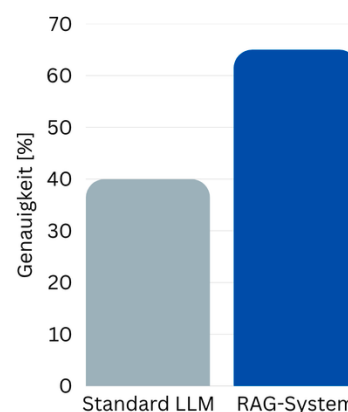


Abb. 2: Generierte Genauigkeit bei 35 Testfragen eines allgemeinen LLM verglichen mit dem implementierten RAG-Ansatzes

buste Mechanismen gegen Halluzinationen zeigte: In Robustheitsfragen erkannte es in 75 % der Fälle korrekt, dass keine Informationen vorlagen und verzichtete auf erfundene Aussagen. Auch die Konsistenzprüfung durch drei vollständige Wiederholungen des gesamten Systems ergab stabile Resultate im Bereich von etwa 60–65 % korrekter Antworten. Tabellenbasierte Inhalte konnten zuverlässig verarbeitet werden,

während grafikbasierte Inhalte erwartungsgemäß Schwierigkeiten bereiteten, da der verwendete Ansatz lediglich Textinformationen verarbeiten kann. Die Vergleichsstudie mit dem allgemeinen GPT-5.0-Modell ohne RAG ergab nur 40 % korrekte Antworten (vgl. Abb. 2) und keine verwertbaren Quellenzitate, womit der Vorteil des RAG-Systems klar bestätigt wurde.

## Diskussion

In der Diskussion werden wesentliche Limitierungen angesprochen. Dazu zählen insbesondere urheberrechtliche Beschränkungen bei der Nutzung des Eurocodes, die das Bereitstellen eines fertigen Systems erschweren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es lediglich möglich, die Normen aus dem Eurocode zu nutzen, sofern eine Veröffentlichung des Benchmarks sowie des Systems ausgeschlossen ist. Ebenso wird deutlich, dass die Verarbeitung grafischer Inhalte sowie komplexe Querschnittsfragen eine Erweiterung der Wissensbasis oder zusätzliche KI-Komponenten erfordern würden. Verbesserungen könnten durch eine feinere Strukturierung der Datenspeicherung, etwa durch getrennte Vektordatenbanken je Norm, oder durch hybride Modelle, die RAG mit gezieltem Fine-Tuning kombinieren, erzielt werden. Auch automatisierte Generierung größerer Benchmark-Sets oder alternative Evaluationsmethoden wie RAFT-Scores oder LLM-basierte Bewertungsmodelle könnten zukünftige Entwicklungen unterstützen.

Vor dem Hintergrund laufender Forschungsarbeiten im Bereich KI-basierter Brückenplanung könnte dieses System zukünftig als Baustein einer umfassenden digitalen Prüf- und Planungsumgebung dienen, in der Normenwissen automatisiert interpretiert, angewendet und verifiziert wird [7].

## Fazit

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass ein RAG-gestütztes System ein vielversprechender Ansatz für die Verarbeitung von Brückenbaunormen in der Praxis darstellt. Es ermöglicht eine Steigerung der Antwortqualität gegenüber rein generischen Sprachmodellen, reduziert Halluzinationen und erlaubt transparente, nachvollziehbare Quellenangaben.

Damit erfüllt es zentrale Anforderungen für den Einsatz in professionellen ingenieurtechnischen Anwendungen.

Trotz der Verbesserungen besteht hinsichtlich der Präzision der Antworten Optimierungspotenzial, um die Zuverlässigkeit für einen Praxiseinsatz zu erhöhen. Besonders aussichtsreich erscheint die Weiterentwicklung zu einem hybriden System, das sowohl die Verifizierbarkeit von RAG als auch die Tiefe eines sorgfältigen Fine-Tunings nutzen kann, um eine vollständige und gleichzeitig zuverlässige Norminterpretation zu gewährleisten. Durch gelernte Verhaltensanweisungen könnten Zusammenhänge zwischen den Dokumenten sowie semantische Feinheiten zur korrekten Antwortgenerierung beitragen.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: "Einsatz von künstlicher Intelligenz in Unternehmen in Deutschland im Jahr 2024." ifo Institut, July 17, 2024. Aufgerufen: Sept. 20, 2025. [Online].  
Verfügbar: Einsatz von künstlicher Intelligenz in Unternehmen in Deutschland im Jahr 2024
- [2]: "Was steckt hinter den 4.000 Baunormen?," DIN. Aufgerufen: Oct. 30, 2025. [Online].  
Verfügbar: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/was-steckt-hinter-den-4000-baunormen-1225682>
- [3]: Dr. Julien Siebert, "Halluzinationen von generativer KI und großen Sprachmodellen (LLMs)," Fraunhofer IESE. Aufgerufen: Oct. 29, 2025. [Online].  
Verfügbar: [www.iese.fraunhofer.de/blog/halluzinationen-generative-ki-llm/](http://www.iese.fraunhofer.de/blog/halluzinationen-generative-ki-llm/)
- [4]: X.-K. Wu *et al.*, "LLM Fine-Tuning: Concepts, Opportunities, and Challenges," *BDCC*, vol. 9, no. 4, p. 87, Apr. 2025, doi: 10.3390/bdcc9040087.
- [5]: "Prompt Engineering vs Finetuning vs RAG." Aufgerufen: Oct. 29, 2025. [Online].  
Verfügbar: <https://www.myscale.com/blog/de/prompt-engineering-vs-finetuning-vs-rag/>
- [6]: M. Arslan, H. Ghanem, S. Munawar, and C. Cruz, "A Survey on RAG with LLMs," *Procedia Computer Science*, vol. 246, pp. 3781–3790, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.09.178
- [7]: J. Wiederer, A.-M. Mehringer, Höng, Simon Konrad, A. Schubert, M. Obergriesser, and M. Kraus, "AI-Drive Data Extraction from Bridge Engineering Documents," Aufgerufen: Oct. 27, 2025.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, July 30, 2009. doi: 10.31030/1723952.
2. Zusätzliche technische Vertragsbestimmungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Feb. 2025. Aufgerufen: Sept. 20, 2025. [Online].  
Available: [https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING-Gesamtfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=26](https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING-Gesamtfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=26)
3. Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten, Dec. 2024. Aufgerufen: Sept. 20, 2025. [Online]. Available: [https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RE-ING-Gesamt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RE-ING-Gesamt.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
4. Richtlinien für das Aufstellen von Bauwerksplanungen für Ingenieurbauten, Jan. 2023. Aufgerufen: Sept. 20, 2025. [Online]. Available: [https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RAB-ING-Entwurf-1-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RAB-ING-Entwurf-1-3.pdf?__blob=publicationFile&v=12)

### Autor

Oberschmid Diana, M. Eng.

#### Akademische Laufbahn:

2019-2023: Bachelor Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

2023-2025: Master Bauingenieurwesen - Digitales Bauen, OTH Regensburg

#### Berufliche Laufbahn:

Okt. 2022 - Feb. 2025: Werkstudentin bei IB Wehrle

März 2025 - Nov. 2025: Werkstudentin bei KB Group

seit Februar 2026: Projektingenieurin im Konstruktiven Ingenieurbau bei Schimetta Consult ZT

### Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl Bauingenieurwesen, Fachbereich Digitales Bauen der OTH Regensburg, unter der Betreuung von Professor Dr.-Ing. Mathias Obergriesser

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# BEWERTUNG DER ABSCHIEBETECHNIK VON THERMOMULDEN UND UNTERSCHIEDLICHER METHODEN ZUR TEMPERATURABSENKUNG VON WALZASPHALTEN

## Bachelorarbeit

*Anna Stenglein*

Die vorliegende Zusammenfassung ausgewählter Aspekte der Arbeit befasst sich mit dem Potenzial der flächendeckenden Temperaturerfassung mittels Thermografie bei Verwendung temperaturabgesenkter Walzasphalte im Asphaltstraßenbau sowie mit der Abschiebetechnik von Thermomulden als Alternative zur konventionellen Kipptechnik in Kombination mit einem Beschicker. Grundlage bilden vier Erprobungsstrecken zum Einsatz temperaturabgesenkter Walzasphalte, von denen für zwei Baumaßnahmen Temperaturdaten aufbereitet und georeferenziert ausgewertet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass Thermografie über ihre dokumentierende Funktion hinaus ein bislang wenig genutztes Instrument zur bauprozessintegrierten Qualitätskontrolle darstellt. Die Bewertung der Abladetechniken erfolgte anhand der granularen und thermischen Homogenität des eingebauten Mischguts sowie ergänzender Mischgutproben. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit der Abschiebetechnik eine mit der Kipptechnik vergleichbare, teils bessere Homogenität innerhalb einzelner Lkw-Ladungen erzielt werden kann. Voraussetzung dafür ist jedoch eine stabile und gleichmäßige Transportlogistik, welche die praktische Umsetzung der Technik derzeit noch einschränkt. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern sowohl für Auftraggeber als auch für Bauunternehmen wichtige Impulse zur qualitätsgesicherten und nachhaltigen Anwendung temperaturabgesenkter Bauweisen im Asphaltstraßenbau.

**Keywords:** Temperaturabgesenkter Walzasphalt, Abschiebetechnik im Asphaltbau, Thermografie, Qualitätssicherung, Digitalisierung der Bauüberwachung

## Einführung

Die wachsenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Arbeitsschutz und Bauqualität stellen den Asphaltstraßenbau vor neue Herausforderungen [1].

Temperaturabgesenkte Asphalte gewinnen dabei an Bedeutung, da sie Emissionen reduzieren und den Arbeits- sowie Gesundheitsschutz auf der Baustelle verbessern [2]. Zugleich verändern die niedrigeren Mischgut- und Einbautemperaturen

die Randbedingungen des Einbauprozesses: Das verkürzte Verdichtungszeitfenster erhöht die Störfähigkeit des Bauablaufs und verlangt eine stabile Logistik [2]. Für die Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen sind die Einhaltung der Verarbeitungstemperatur und eine hohe thermische Homogenität des Mischguts entscheidend. Zu kaltes Mischgut erschwert das Erreichen des erforderlichen Verdichtungsgrads und begünstigt somit frühzeitige Schäden [3].

Im Rahmen der Erprobungsstrecken zum Einsatz temperaturabgesenkter Walzasphalte gemäß dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 09/2021 [4] rückte daher die Temperaturüberwachung verstärkt in den Fokus. Während in anderen Branchen, etwa der Automobilindustrie, der Trend zur automatisierten 100%-Qualitätskontrolle geht, basiert die Qualitätssicherung im Asphaltstraßenbau weiterhin überwiegend auf stichprobenartigen Überprüfungen. Durch digitale Messsysteme wie Thermoscanner und Wärmebildkameras lassen sich die Oberflächentemperaturen hinter der Einbaubohle flächendeckend erfassen, kritische Bereiche frühzeitig erkennen und prozessbegleitend korrigieren (vgl. Abb. 1 und 3).

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die thermische Homogenität ist die Abladetechnik [5]. Die Abschiebetechnik von Thermomulden bietet in diesem Zusammenhang eine Alternative zum konventionellen Einbauzug aus Lkw mit Kipptechnik und Beschicker. Die Auswirkungen dieser Abladetechnik lassen sich im Thermoscan unmittelbar abbilden.

Der Einsatz der Thermografie als Steuerungsinstrument im Asphaltbau sowie die Bewertung

der Abschiebetechnik bilden Schwerpunkte der Arbeit und wurden anhand zweier Baumaßnahmen untersucht. Diese beiden Themen werden in der vorliegenden Zusammenfassung vertieft betrachtet. Ergänzend befasst sich die Arbeit mit der Ausschreibung temperaturabgesenkter Bauweisen auf Basis zweier weiterer Erprobungsstrecken. Zudem werden materialtechnische Fragestellungen zur Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit von Asphalt beleuchtet. Untersucht wurden der Einfluss der Temperaturabsenkung auf die Kurzzeitalterung von Bindemitteln sowie der Einsatz gummimodifizierter Bindemittel in temperaturabgesenktem Mischgut unter Zugabe von Asphaltgranulat. Ziel ist es, die Herausforderungen beim Einsatz temperaturabgesenkter Walzasphalte zu identifizieren und daraus praxisnahe Handlungsempfehlungen für Planung, Ausschreibung und Bauausführung abzuleiten.

## Thermografie als Steuerungsinstrument im Asphaltbau

Beim Einbau temperaturabgesenkter Walzasphalte wurden im Rahmen zweier Baumaßnahmen Thermoscanner eingesetzt, deren Rohdaten bereinigt, georeferenziert und in der Open-Source-Software QGIS visualisiert wurden (vgl. Abb. 1). Die flächig dargestellten Thermoscandaten liefern mehrere praxisrelevante Erkenntnisse: In einer Einbaubahn wurde ein durchgehend kühler Streifen im eingebauten Asphaltmischgut festgestellt, der auf eine Störung an der Fertigerbohle (z. B. defekte Heizung) hinweist. Dies wurde jedoch erst in der nachträglichen Auswertung erkannt. Dieses Beispiel verdeutlicht das bislang



Abb. 1: Darstellung der Lkw-Wechsel im Thermoscan; schwarze Zahlen entsprechen den Distanzen zwischen kühleren Zonen in m, weiße Zahlen entsprechen den Temperaturen in °C.

ungenutzte Potenzial der Thermografie zur frühzeitigen Identifikation technischer Störungen.

Die Temperaturplots zeigen darüber hinaus einen regelmäßigen Wechsel zwischen kühleren und wärmeren Zonen im eingebauten Mischgut trotz eingesetztem Beschicker. Die Abstände der Temperaturminima entsprechen etwa der je Lkw-Ladung herstellbaren Streckenlänge (vgl. Abb. 1). Dadurch wird deutlich, dass zu Beginn des Abladens infolge der Schwerkraftentladung zunächst thermisch, teils auch granular entmischtetes Mischgut aus den oberen Schichten der Mulde abgekippt und zeitverzögert eingebaut wird [6]. Neben den durch Lkw-Wechsel bedingten Temperaturwellen resultieren thermisch kritische Bereiche aus Fertigerstillständen. Diese entstehen durch logistische und baubedingte Einflüsse wie Handeinbau oder verzögerte Asphaltlieferungen. Zur quantitativen Bewertung werden die während der Baumaßnahme aufgetretenen Stillstände hinsichtlich ihrer Dauer analysiert und die über den Straßenquerschnitt resultierenden minimalen und maximalen Oberflächentemperaturdifferenzen in Abb. 2 dargestellt.

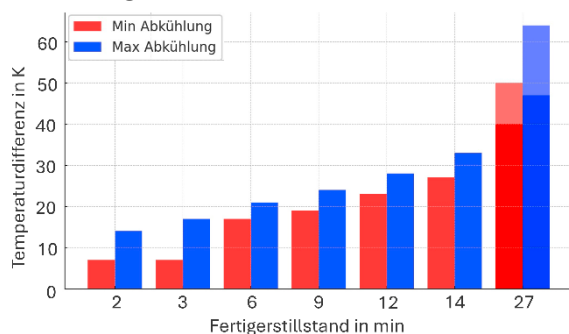


Abb. 2: Minimale und maximale Oberflächentemperaturdifferenzen im eingebauten Asphaltmischgut infolge verschiedener Fertigerstillstandszeiten.

Das Diagramm verdeutlicht, dass bereits kurze Stillstandszeiten zu merklichen Temperaturverlusten an der Oberfläche führen. Insbesondere bei temperaturabgesenkten Asphalten wird das ohnehin verkleinerte Verdichtungszeitfenster weiter verkürzt, wodurch das Risiko unzureichender Verdichtung steigt. Während längerer Stillstände kühlt das Mischgut hinter der Bohle ab und kann nicht verdichtet werden. Nach Wiederaufnahme des Einbaus entstehen so quer verlaufende Bereiche mit reduzierter Dichte [7].

Erfolgt eine Echtzeitübertragung der Thermoscandaten, können thermisch kritische Zonen bereits während des Einbaus erkannt und durch gezielte Eingriffe in den Bauablauf reduziert werden. Ohne Gegenmaßnahmen können geringe Entmischungsgrade Mehrkosten von rund 10 % verursachen, hohe Entmischungen bis zu 46 % [7].

Temperaturmessungen entlang der Einbaukette zeigen zudem, dass die größten Temperaturverluste im Mischgut nicht während des Transports in Thermomulden, sondern im Einbauzug auftreten. Dies bestätigen auch die Ergebnisse des Forschungsprojekts PAST [5]. Vor allem die Zwischenspeicherung und erneute Durchmischung des Asphalts im Beschicker führen zu zusätzlicher Abkühlung. Die Abschiebetechnik setzt hier an, indem das Mischgut ohne Zwischenspeicherung direkt vom Lkw in den Fertiger übergeben wird und so Temperaturverluste im Materialfluss minimiert werden können.

## Thermomulden mit Abschiebetechnik

Thermomulden mit Abschiebetechnik übergeben das Asphaltmischgut schiebchenweise, gleichmäßig und kontrolliert mittels eines horizontalen Schiebers an den Fertigerkübel. Dadurch gelangen kühleres, gröberes Mischgut aus den oberen Schichten der Mulde und heißeres, feineres Material aus den unteren Schichten zeitgleich in den Kübel. Dies bewirkt eine Homogenisierung bereits während des Abladens – auch ohne den Einsatz eines Beschickers [8].

Zur Bewertung der Abschiebetechnik wurden granuläre und thermische Homogenität untersucht. Siebanalysen zeigen, dass die Abladeweise den Verzicht auf einen Beschicker ohne Beeinträchtigung der granularen Mischguthomogenität ermöglicht. Thermoscandaten und Wärmebilddaufnahmen belegen in den mittleren Bereichen einzelner Lkw-Ladungen eine mit der Kipptechnik mit Beschicker vergleichbare, teils bessere Temperaturverteilung (vgl. Abb. 3).

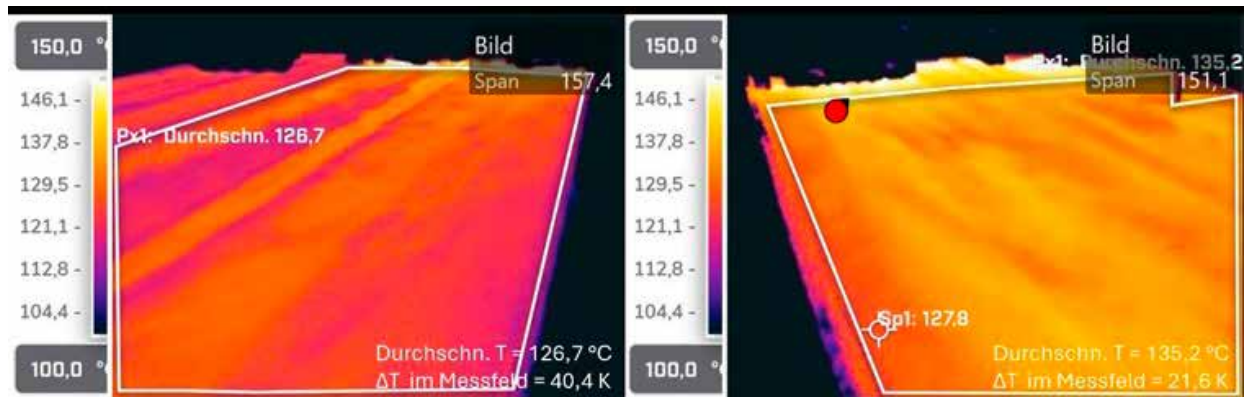


Abb. 3: Gegenüberstellung der beiden Abladetechniken zur zeitlichen Mitte des Abladeprozesses anhand von Wärmebildern; links Kipptechnik mit Beschicker, rechts Abschiebetechnik ohne Beschicker.

Schwachstellen treten bei Lkw-Wechseln auf, bei denen zu Abladebeginn kühleres Mischgut entladen wird. Eine Schwenkbeladung der Lkw könnte diesen Effekt durch den daraus resultierenden konstanten Mischgutquerschnitt verbessern.

Untersuchungen unter idealisierten Einbaubedingungen zeigen für die Abschiebetechnik gegenüber dem konventionellen Einbauzug reduzierte Temperaturdifferenzen (rund 10 K gegenüber 13 K) [6]. Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen jedoch, dass dies auf reale Bedingungen nicht uneingeschränkt übertragbar ist. Aufgrund des Verzichts auf einen Beschicker ist die Abschiebetechnik stärker von einer stabilen und gleichmäßigen Transportlogistik abhängig. In der Praxis führt dies zu einer erhöhten Anfälligkeit für Fertigerstillstände, die mit deutlichen Abkühlungen des Mischguts verbunden sind. Diese Effekte treten beim konventionellen Einbauzug aufgrund der kontinuierlichen Materialzufuhr seltener auf. Daher kann die Abschiebetechnik die Kipptechnik mit Beschicker derzeit noch nicht vollständig ersetzen. Vorteile dieser Technik liegen insbesondere in der erhöhten Arbeitssicherheit und der verbesserten Steuerbarkeit des Abladens. Im Gegensatz zur Kipptechnik erfordert die Abschiebetechnik keinen zusätzlichen Freiraum nach oben, wodurch Kollisionen mit Vegetation, Bauwerken oder Freileitungen vermieden werden können.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Thermografie ein erhebliches Potenzial bietet, die Qualitätssicherung im Asphaltstraßenbau fundamental weiterzuentwickeln. Temperaturmesssysteme sollten nicht nur dokumentieren, sondern aktiv zur prozessintegrierten Steuerung während des Einbaus genutzt werden. Dies gewinnt vor dem Hintergrund temperaturabgesenkter Asphaltbauweisen und der damit verbundenen verschärften Randbedingungen des Einbaus an Bedeutung. Statt stichprobenartiger Prüfungen ermöglicht Thermografie eine flächendeckende Schwachstellenanalyse. Dadurch können Ressourcen gezielt eingesetzt und die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigungen erhöht werden.

Aktuelle Entwicklungen im Asphaltregelwerk unterstreichen die Relevanz temperaturabgesenkter Bauweisen und markieren einen grundlegenden Wandel im Asphaltstraßenbau [9]. Die verbleibende Übergangszeit bis zu deren verpflichtenden Anwendung sollte die Branche nutzen, um Erfahrungen zu sammeln und praxistaugliche Lösungen für Planung und Bauausführung zu entwickeln. Thermografie leistet hierbei während der Bauausführung einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung und Ressourceneffizienz. Ergänzend zeigen optimierte Einbautechniken wie die Abschiebetechnik sowie die Verwendung leistungsfähiger Materialien wie gummi-modifizierter Bindemittel zusätzliche Potenziale für eine qualitätsgesicherte und nachhaltige Umsetzung auf.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schacht, A.; Buch, M. (2023): Einfluss viskositätsverändernder Zusätze auf die Asphaltperformance – Teil 1. In: asphalt 58.8, S. 42 - 47.
- [2]: Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V. (2021): Technisches Informationspapier – Niedrigtemperaturasphalt (NTA). Bonn, S. 5 - 12.
- [3]: Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V. (1999): Qualität organisieren – wer, was, wann, wie, wo. Bonn, S. 52 - 53.
- [4]: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 09/2021. Bonn.
- [5]: Bundesanstalt für Straßenwesen (2015): Jahresbericht 2013 / 2014. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft A 37, Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, Bremen, S. 119 - 121.
- [6]: Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH (2021): Untersuchungen im Asphaltbau. Mit moderner Technik frühzeitige Straßenschäden bereits beim Asphalt-Einbau vermeiden. Mühldorf a. Inn.
- [7]: Stroup-Gardiner, M.; Brown, E. R. (2000): NCHRP Report 441: Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board – National Research Council, Washington, D.C, S. 84 - 87.
- [8]: Hutschenreuther, J.; Wörner, T. (2017): Asphalt im Straßenbau. 3. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 157.
- [9]: Flottmann, N.; Weißelborg, H.-H. (2024): Die Schlussentwürfe zu den TL Asphalt-StB und den ZTV Asphalt-StB Teil 1 liegen vor – Wie soll der Einsatz von temperaturabgesenkten Asphalten in der Praxis erfolgen? In: Straße und Autobahn 75.10, S. 887 - 895.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V. (2009): Temperaturabgesenkte Asphalte. Ratschläge aus der Praxis für die Praxis. Bonn.
2. Karcher, C.; Jansen, D. (2024): Straßenbau und Straßenerhaltung. Ein Handbuch für Studium und Praxis. 11. neu bearbeitete Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
3. Rosauer, V. (2021): Temperaturabgesenkter Asphalt – Das neue Merkblatt. In: Straße und Autobahn 72.10, S. 835 - 842.

## Autorin

Anna Stenglein, B.Eng.

### Studium:

Seit 2025      Masterstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg  
 2021 – 2025   Bachelorstudium Bauingenieurwesen, OTH Regensburg

### Berufserfahrung:

Seit 2025      Technische Beschäftigte (Teilzeit) im Staatlichen Bauamt Regensburg  
 Seit 2023      Studentische Hilfskraft und Tutorin im Modul Straßenbau I an der OTH Regensburg  
 2023 – 2025   Duale Studentin im Staatlichen Bauamt Regensburg  
 2021 – 2023   Duale Studentin im Staatlichen Bauamt Bayreuth

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt an der Fakultät Bauingenieurwesen im Labor für Straßenbau und Asphalttechnologie an der OTH Regensburg. Betreuer der Arbeit war Prof. Dipl.-Ing. Andreas Appelt, Zweitprüfer war Prof. Dr.-Ing. Matthias Spangler.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
 über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES STANDARDISIERTEN BIM-WORKFLOWS ZUR ÖKOLOGISCHEN OPTIMIERUNG VON GEBÄUDEN IN LEISTUNGSPHASE 2

## Masterarbeit

*Alisa Teufel*

Die Masterarbeit leistet einen Beitrag zur Digitalisierung der Bauwirtschaft und zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks durch frühzeitige ökobilanzielle Entscheidungsunterstützung. Sie untersucht die systematische Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die BIM-basierte Gebäudeplanung ab Leistungsphase 2, mit Schwerpunkt auf ökobilanziellen Kennwerten. Vor dem Hintergrund der hohen Klimarelevanz des Bausektors und der bislang späten Anwendung von Lebenszyklusanalysen adressiert die Arbeit den Mangel an standardisierten, digital unterstützten Verfahren zur prüfbar und vergleichbar Berücksichtigung nachhaltiger Planungsentscheidungen in frühen Phasen. Ziel ist die Entwicklung eines openBIM-fähigen Workflows, der DGNB-Anforderungen mit der Ökobilanzierung verknüpft und eine belastbare Entscheidungsgrundlage für nachhaltige Variantenvergleiche bereits in Leistungsphase 2 schafft. Der Ansatz basiert auf definierten Informationsanforderungen, regelbasierten Modellprüfungen und automatisierten Schnittstellen zur Ökobilanzierung und einer praxisnahen Validierung am Start-Up-Center des Innovationsparks Artificial Intelligence (IPAI) in Heilbronn. Für die Baupraxis, insbesondere mittelständische Unternehmen, bietet die Masterarbeit eine standardisierbare, effiziente Lösung zur transparenten Bewertung von Planungsvarianten, Reduzierung von Risiken und zur Vorbereitung von Zertifizierungen. Damit leistet die Arbeit erstmalig einen übertragbaren Beitrag zur Digitalisierung nachhaltiger Planungsprozesse in einer besonders frühen Leistungsphase.

**Keywords:** BIM, DGNB, Nachhaltigkeit, Ökobilanz, Modellprüfung, LP 2, Workflow, Zertifizierung

### Ausgangslage und Relevanz

Der Bausektor steht vor erheblichen Herausforderungen in Bezug auf Klimaschutz und Ressourceneffizienz. Obwohl Gebäude einen erheblichen Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen haben, werden ökobilanzielle Aspekte, wie CO<sub>2</sub>-

Emissionen, in der Planungspraxis häufig erst in späten Phasen berücksichtigt, obgleich sich durch BIM die Grundlage für Planungsentscheidungen hin zu frühen Phasen verlagert. Darüber hinaus sinkt das Optimierungspotential und Kosten steigen mit zunehmender Leistungsphase. [1]

Das bedeutet, dass zentrale Steuerungspotenziale ungenutzt bleiben, obwohl insbesondere die Leistungsphase 2 aufgrund ihres erheblichen Einflusses auf die Gestaltung, die Materialauswahl und die Gebäudestruktur, einen entscheidenden Hebel zur Reduzierung späterer Umweltauswirkungen bietet. [2] In der Praxis fehlen jedoch standardisierte, digital gestützte Verfahren, um Nachhaltigkeitsanforderungen in dieser frühen Phase systematisch, prüfbar und vergleichbar abzubilden.

## Zielsetzung und Forschungsfrage

Die Masterarbeit zielt darauf ab, diese Lücke zu schließen und frühzeitig einen methodisch fundierten Beitrag zur nachhaltigen Gebäudeplanung zu leisten. Zentrale Forschungsfrage ist, wie Nachhaltigkeitsanforderungen, insbesondere Lebenszyklus-Bewertungsparameter, ab der Leistungsphase 2 systematisch, transparent und vergleichbar in den Entwurfsprozess integriert werden können. Ziel ist es, einen BIM-gestützten Workflow zu entwickeln und zu validieren, der die DGNB-Zertifizierungsanforderungen mit der Ökobilanzierung verknüpft und damit eine frühzeitige, verlässliche Entscheidungsgrundlage für nachhaltige Variantenvergleiche mit hoher Übertragbarkeit auf unterschiedliche Projekte und Organisationen schafft.

## Methodik – Entwicklung eines BIM-gestützten Workflows

Unter dieser Prämisse ist ein neuer und einmaliger Workflow basierend auf eine systematische Literatursauswertung hinsichtlich der Themen DGNB-Zertifizierung, Building Information Modeling, Ökobilanzierung und der Analyse des Status quo entstanden. [Abb. 2]

Dieser gliedert sich in sechs Bausteine [Abb. 2], die im Folgenden einzeln betrachtet und hergeleitet werden.

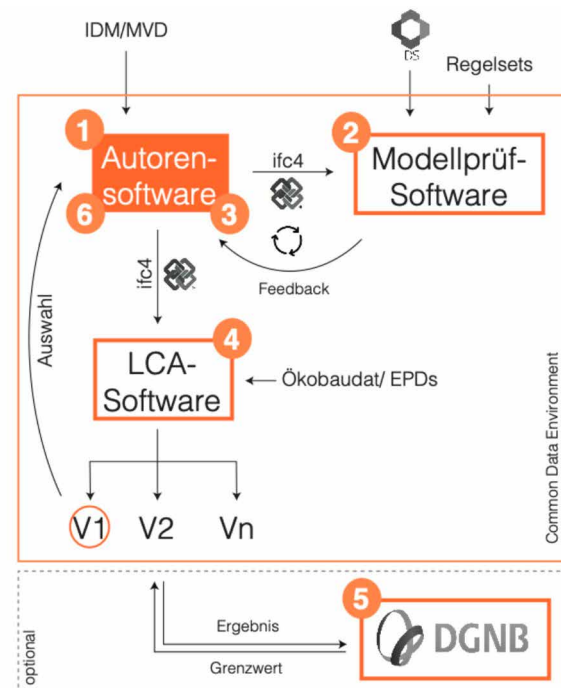


Abb. 2: Software-unabhängiger BIM-Workflow

Im ersten Schritt muss das Modell für einen BIM-fähigen Workflow modelliert werden. Dafür stellt sich die Frage nach der Detailtiefe der Modellierung. Hierfür wird zur Herleitung zunächst betrachtet, wie sich die Leistungsphase 2, im Folgenden mit LP2 abgekürzt, nach HOAI definiert, um den konkreten Informations- und Datenbedarf und -gehalt eines Modells in LP2 abstecken zu können. Es muss geklärt werden, ob ein Modell den Datenbedarf für eine Ökobilanzierung in LP2 überhaupt abdecken kann, die Grundvoraussetzung für den angestrebten BIM-Workflow. Die Analyse ergab einen Datenbedarf in LOD 100, also die Modellierung eines konzeptionellen Massenmodells mit Informationen zu Wänden/ Decken/ Dächer/ Türen und Fenstern. Da die HOAI für LP2 eine Kostenschätzung nach DIN 276 und Plandarstellungen in 1:200 verlangt, liegen alle nötigen Bauteilinformationen vor und können als Sowieso-Daten in der Autorensoftware modelliert werden.

Diese Erkenntnis hat insbesondere eine Frage zur Folge: wie können ebendiese Informationen nun fehlerfrei aus einem Modell in LOD100 herausgefiltert werden? Eine ausführliche Recherche

ergab hier eine Modellprüfung als Antwort: die sogenannte BIM-basierte Modellprüfung–Schritt zwei des Workflows. Mit Hilfe einer solchen Software kann im IFC4-Format konkret geprüft werden, ob alle Informationsanforderungen erfüllt werden und ein korrekter Export für eine Ökobilanzierung stattgefunden hat. Fragen wie „Wurde das Attribut korrekt gemapped, also stimmt die Position und Inhalt der Information? Ist die benötigte Information wie Name, Datentyp, Menge und Einheit, vorhanden?“, müssen beantwortet werden. Dafür wurde speziell eine sogenannte Information-Delivery-Specifications-Datei (IDS-Datei) zur universellen Anwendung geschrieben, die ein Modell auf eben genau diese Attribute hin mit Hilfe einer Modellprüfsoftware prüft und bei fehlender oder mangelnder Information warnt. Über einen zusätzlichen Regelsatz kann die Modellprüfsoftware darüber hinaus sicherstellen, dass die Qualität des Modells eine Ökobilanzierung nicht beeinflusst: hier werden beispielsweise Fragen nach doppelten Bauteilen oder fehlerfreier Modellierung beantwortet. Die doppelte Prüfstruktur durch IDS und Regelsatz vor einer Ökobilanzierung hat einen lückenlosen Audit-Trail mit Feedbackschleife zur Folge, der essenziell für eine belastbare Ökobilanzierung in LP2 ist.

Um sicherzustellen, dass auch nur die benötigten Informationen exportiert werden, empfiehlt es sich darüber hinaus, eine Model View Definition (MVD) in die Autorensoftware einzuladen, sodass in jedem Variantenentwurf das gleiche Prüfschema entsteht. Sie legt fest, welche Bauteile exportiert werden sollen. Ein Information Delivery Manual (IDM) regelt darüber hinaus, wer wann für die Lieferung welcher Information zuständig ist, um einen reibungslosen zeitlichen Ablauf und klare Zuständigkeiten über eine fehlerfreie Datei hinaus zu gewährleisten.

Im dritten Schritt wird das Feedback aus der Modellprüfung in die Autorensoftware zurückgespielt und in das Modell eingearbeitet, sodass es fehlerfrei über einen erneuten IFC-

Export in verschiedenen Varianten in die Bilanzierungssoftware eingepflegt werden kann. LOD100 bedeutet auch, dass das Modell noch keine Materialbelegung erfahren hat – ein Fakt, der die Ökobilanzierung in LP2 so schwierig macht. Nun ist es aber möglich, aus dem Modell in LOD100 keine Massen herauszulesen, sondern nur Flächen. Diese Art des zweidimensionalen Exports, festgelegt über die MVD, macht eine Materialbelegung in einer Ökobilanzierungssoftware im vierten Schritt möglich. Informationen zu Wandaufbauten und -stärken werden erst hier ergänzt und können auf ökobilanzielle Faktoren hin verglichen werden.

Der fünfte Schritt ist als optional zu verstehen und beschreibt die Schnittstelle des Workflows zu einer etwaigen DGNB-Zertifizierung. Er macht einen konkreten Mehrwert der Anwendung und damit das Potential des Workflows konkret sichtbar: Durch Identifikation relevanter Parameter innerhalb der Zertifizierung durch Abgleich über 500 Indikatoren hinsichtlich Relevanz für den Workflow, Anwendbarkeit in einer frühen LP, Fähigkeit der Darstellbarkeit in einem semantischen BIM-Modell und der Verbindung zur Ökobilanzierung lässt sich folgender Anteil des Workflows an der Erfüllung verschiedener DGNB-Zertifikate bestimmen:

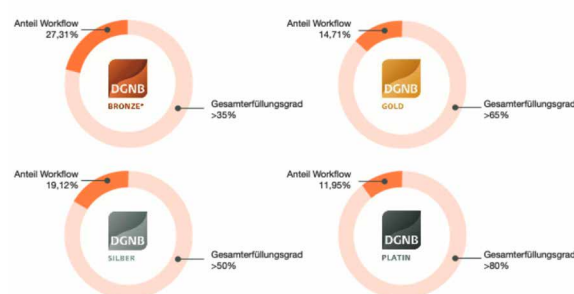


Abb. 3: Anteil Workflow an Gesamterfüllung Zertifikat

Im sechsten Schritt wird dann schlussendlich nur noch eine der verglichenen Varianten auf Basis ihrer ökobilanziellen Kennwerte gewählt und schlussendlich in der Autorensoftware weiterverfolgt.

## Praxisvalidierung

Die Praxisvalidierung erfolgt anhand des Planstandes LP2 des Start-Up Center im Innovation Park Artificial Intelligence (IPAI) in Heilbronn, einem Projekt mit hohen ökologischen Zielsetzungen und angestrebter DGNB-Platin-Zertifizierung. Das Start-Up Center wurde entlang des Workflows auf zwei Fassadenalternativen hin analysiert. Praxisspezifisch ist der Workflow hierzu nach eingehender Software-Testphase mit Software-Vorschlägen [Abb. 4] ergänzt worden.

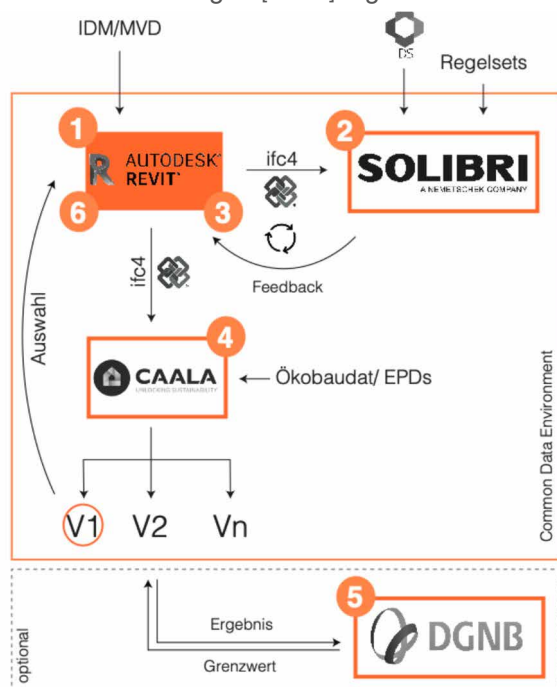


Abb. 4: Software-abhängiger BIM-Workflow

Nach Durchführung des Workflows muss die Frage nach der Umsetzbarkeit beantwortet werden. Basierend auf der Praxisvalidierung ergeben sich verschiedene Kenngrößen: Erstens lässt sich zur Umsetzbarkeit sagen, dass der Workflow gemäß der Schritt-für-Schritt-Anleitung einen Implementierungsgrad von 100% aufweist. Der Anteil von automatisierten Prozessen im Vergleich zu nutzergestützten Arbeitsschritten liegt bei etwa 60%, wobei 100% des Workflows Softwaregestützt sind. Die Durchlaufzeit ist stark abhängig von der Qualität des Modells, liegt aber im Anwendungsfall bei ca. 10 Stunden pro Modell, da beide extern übernommen und mehrfach Feedbackschleifen zur Sicherung der Modell-

qualität durchlaufen mussten. Besonders interessant ist die Betrachtung der Fehlerquote des Modells in der Modellprüf- sowie der Ökobilanzsoftware [Abb.5]: sie konnte jeweils von mehreren Hundert auf 0 reduziert werden – ein deutlicher Hinweis auf den Erfolg der Kopplungsstrategie der Ökobilanzsoftware mit der Modellprüfsoftware.

|                                                                                      | Solibri                                 |                                                | CAALA                       |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|
|                                                                                      | Fehlermeldung Regelset                  | Fehlermeldung IDS                              | nicht unterstützte Elemente | fehlende Details |
| vor Export nach MDV; Standardmäßiger IFC-Export                                      | 169 Probleme mit kritischem Schweregrad | nicht prüfbar, da Ifc2x3 anstatt Ifc4 vorliegt | 2289                        | 740              |
| nach Export nach MDV, vor Prüfung durch Solibri                                      | 73 Probleme mit kritischem Schweregrad  | 5 Probleme mit mittlerem Schweregrad           | 86                          | 31               |
| nach Export nach MDV, nach Korrektur des Modells auf Basis der Prüfung durch Solibri | 0 Probleme mit kritischem Schweregrad   | 0 Probleme                                     | 0                           | 0                |

Abb. 5: Fehlerquote BIM-Modell nach verschiedenen Anwendungsschritten

## Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine systematische, BIM-gestützte Integration von ökobilanzrelevanten Parametern bereits in der Vorplanung technisch und methodisch machbar ist. Der entwickelte Arbeitsablauf ermöglicht es, nachhaltigkeitsrelevante Informationen strukturiert zu erfassen, automatisch zu überprüfen und für fundierte Vergleiche verschiedener Varianten zu nutzen. Der zentrale Beitrag der Arbeit liegt in der Verlagerung einer Entscheidungsgrundlage hin zu einer früheren Planungsphase, die BIM-basiert den größtmöglichen Hebel für ein nachhaltiges Gebäude bietet. Für die Baupraxis, insbesondere mittelständische Unternehmen, bedeutet dies eine effiziente, standardisierbare Umsetzung ohne hochspezialisierte Einzellösungen und eine daraus folgende transparente Bewertung von Planungsvarianten, sowie der Reduzierung von Risiken und Nachträgen. Der Ansatz bietet darüber hinaus hohes Transferpotenzial. Der Workflow ist als standardisierte Prozessvorlage konzipiert und kann auf unterschiedliche Projekttypen und Organisationsebenen skaliert werden. Zukünftig ist zu erwarten, dass sich der Erfolg langfristig durch Anwendung in Pilotprojekten bestätigen lässt.

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Schnorbus, Alexander, Henrieke Lerch, Kim Könemann, Marlene Holst, Michelle Kaus, und Paul Roggatz. Modellbasierte Nachhaltigkeitsbewertung. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Nov. 23.
- [2]: Bartels, Niels, Jannick Höper, Sebastian Theißen, und Reinhard Wimmer. Anwendung der BIM-Methode im nachhaltigen Bauen: Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Bartels, Niels, Jannick Höper, Sebastian Theißen, und Reinhard Wimmer. Anwendung der BIM-Methode im nachhaltigen Bauen: Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
2. BIM-Basierte Ökobilanzierung – Design Computation. o. J. Zugriffen 16. Mai 2025. <https://dc.rwth-aachen.de/electronic-life-cycle-assessment-elca/>.
3. Ebertshäuser, Sebastian, René Traunspurger, Rafael Horn, und Christian Schmid. BIM-BASIERTE INTEGRALE PLANUNG (BIM2LCA4IP). KIT, DGNB e.V., IBP, 2020.
4. Klemt-Albert, Katharina. Optimierung der Nachhaltigkeit von Bauwerken durch die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die digitale Methode Building Information Modeling. With Michael Brüggemann und Gottfried Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover. Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3213. Fraunhofer IRB Verlag, 2020.

## Autor

Teufel Alisa, B.A. und M. Eng.

### Ausbildung

- 10/2020 – 08/2024 B.A. Architektur  
Technische Universität München
- 10/2024 – 09/2025 M. Eng. Integrales Planen und Bauen  
Technische Hochschule Würzburg – Schweinfurth
- 11/2025 – 11/2027 Staatliche Weiterbildung zur Regierungsbaumeisterin  
Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr

### Berufserfahrung

- 04/2022 – 08/2024 Werkstudentin Objektplanung Goldbeck Süd GmbH
- 03/2025 – 08/2025 Masterandin und Werkstudentin Schwarz Immobilienservice
- 11/2025 – aktuell Baureferendarin im Staatlichen Bauamt Landshut

## Betreuer und Industriepartner

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl Architektur, Fachbereich Digitales Planen und Bauen der THWS unter Professor Christian Hofmann in Kooperation mit dem Schwarz Immobilienservice.

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# INSTANDSETZUNG VON FIRSTHOHLSTELLEN BEI TUNNELN IN NEUER ÖSTERREICHISCHER TUNNELBAUWEISE

Entwicklung und Untersuchung von Verfahren und Materialien zum sicheren Verfüllen

## Masterarbeit

*Hannes Venneklaas*

Im Münchner U-Bahnnetz wurden bei in Neuer Österreichischer Tunnelbauweise (NÖT) aufgefahrenen Tunneln Hohlstellen zwischen der Innen- und der Außenschale festgestellt. Diese Hohlräume beeinträchtigen nicht nur die Dauerhaftigkeit der Bauwerke; abhängig von ihrer Größe und der Lage des betroffenen Tunnelabschnitts kann zudem eine Einschränkung der Standsicherheit nicht ausgeschlossen werden.

Im Rahmen eines ersten Instandsetzungsprojekts konnte bei mehreren Hohlstellen nicht der angestrebte Sanierungserfolg erzielt werden. Daraus ergab sich die zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit: Wie können die beschriebenen Hohlstellen sicher und dauerhaft instandgesetzt werden?

Neben der Identifikation geeigneter Verpressmaterialien wurden in dieser Arbeit an Modellen im Maßstab 1:1 verschiedene Verfahren untersucht, die ein sicheres und vollständiges Verpressen der Hohlräume ermöglichen. Auf Basis der erzielten Ergebnisse konnten sowohl die maßgeblichen Randbedingungen für den Einsatz unterschiedlicher Materialien definiert als auch Verfahren entwickelt werden, die in zukünftigen Instandsetzungsprojekten der Stadtwerke München Anwendung finden können und bereits gefunden haben.

**Keywords:** Firsthohlstellen, Verpressverfahren, Instandsetzung von Tunnelbauwerken, Ultraschalldetektion im Tunnelbau, Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT-Bauweise), Hohlraumverfüllung, Betoninstandsetzung

## Ausgangslage und Motivation

Im Münchner U-Bahnnetz wurden rund 65 km Tunnel in Neuer Österreichischer Tunnelbauweise (NÖT) aufgefahren. Diese zweischalige Bauweise umfasst eine nicht

tragende Spritzbeton-Außenschale – in München häufig etwa 15 cm – sowie eine geschalte, regelmäßig 35 cm dicke Innenschale. Bei mehreren dieser Tunnel wurden im Zuge turnusmäßiger Bauwerksprüfungen ausgeprägte

Rissbilder festgestellt, die Anlass zu weitergehenden Untersuchungen gaben. Ultraschallmessungen zeigten in ersten Abschnitten Hohlstellen zwischen Innen- und Außenschale. **Abbildung 1** zeigt beispielhaft die Visualisierung einer Messung entlang der Tunnelachse mit einer erfassten Hohlstelle auf der linken Seite. Die Grafik zeigt die Reflexion der Ultraschallwellen an den Grenzschichten des Betons, in diesem Fall deutlich vor der Solldicke von 35cm.

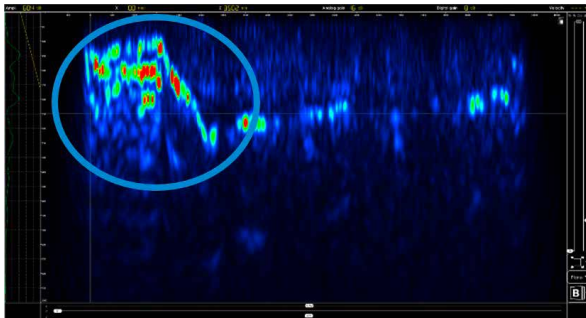


Abb. 1: Ultraschallbild einer Hohlstelle

Nach aktuellem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass sämtliche in NÖT-Bauweise errichteten Streckenabschnitte betroffen sind, das Bauwerksalter spielt dabei keine Rolle. In einem ersten Pilotprojekt wurden die Hohlstellen im Abschnitt zwischen Ostbahnhof und Innsbrucker Ring systematisch erfasst. Dabei traten teils erhebliche Unterschreitungen der Soll-Innenschalendicke auf; in einzelnen Bereichen lag sogar die äußere Bewehrungslage frei. Die im Pilotprojekt durchgeführten Instandsetzungen erzielten zudem nicht an allen Schadstellen den erwarteten Verpresserfolg, was spätere Untersuchungen mittels Sondierbohrungen bestätigten, und die Relevanz vertiefter Forschung unterstreicht.

Hohlstellen reduzieren nicht nur den wirksamen Betonquerschnitt, sondern können auch die Passivierung der Bewehrung beeinträchtigen. Dadurch lässt sich eine Korrosion der Bewehrung grundsätzlich nicht ausschließen, was sowohl die Dauerhaftigkeit als auch die Standsicherheit des Bauwerks beeinträchtigen kann.

## Zielsetzung der Arbeit

Folgende Ziele wurden im Rahmen der Arbeit erreicht:

- Identifikation geeigneter Verpressmaterialien für die sichere und dauerhafte Verfüllung der Hohlräume zwischen Innen- und Außenschale.
- Entwicklung und Festlegung eines Verfahrens, das einen zuverlässigen Verpresserfolg gewährleistet.
- Experimentelle Validierung der theoretischen Erkenntnisse an 1:1-Modellen einer Tunnelinnenschale
- Erfolgreiche Überführung der Ergebnisse in die Praxis durch Anwendung in den Instandsetzungsprojekten der Stadtwerke München (ab März 2025).

## Methodik und Vorgehensweise

Die beschriebenen Ziele wurden mit Hilfe der drei folgenden zentrale Arbeitsschritte erreicht:

1. Analyse der relevanten normativen Grundlagen
2. Untersuchung potenziell geeigneter Materialien im Labor
3. Praktische Erprobung der Instandsetzung in 1:1 Modellen einer Tunnelschale

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden aus den für die Instandhaltung relevanten Regelwerken – insbesondere den *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für Ingenieurbauten* (ZTV-ING) sowie der *Richtlinie Instandhaltung von Betonbauteilen* (TR-IH) – diejenigen Anforderungen extrahiert, die sich auf das kraftschlüssige Füllen von Fehlstellen übertragen lassen. Obwohl beide Richtlinien die Sanierung großvolumiger Hohlstellen nicht beschreiben, konnten wesentliche technische und verfahrensbezogene Grundsätze abgeleitet werden, welche für die Entwicklung des eigenen Vorgehens dienten.[1][2][3]

Ein entscheidender Bestandteil der Methodik war die Entwicklung von Testkörpern, welche den relevanten Bereich des Tunnelfirsts im Maßstab 1:1 nachbilden. Durch das gezielte Einbringen künstlicher Hohlstellen konnten realitätsnahe

Versuchsbedingungen geschaffen und die Forschungsfrage experimentell untersucht werden. Die Testkörper wurden von dem Autoren dieser sowie einer parallellaufenden Masterarbeit konstruktiv ausgearbeitet und anschließend von einem Fertigteilwerk hergestellt.



Abb. 2: Testkörper Nr. 5 mit Hohlstelle 20cm

Die acht Testkörper wurden in zwei Varianten gefertigt (Hohlstellen von 10 cm bzw. 20 cm Höhe). Abbildung 2 zeigt beispielhaft Testkörper 5 vor der Instandsetzung; der zweischalige Aufbau sowie der ausgeprägte Zwischenraum sind deutlich erkennbar. Die offenen Längsseiten wurden mit Plexiglas verschlossen, um den Materialfluss während der Verpressung beobachten zu können.

Parallel zur praktischen Erprobung der Instandsetzung wurden die in Frage kommenden Materialien im Labor der Hochschule München hinsichtlich ihrer bauteilrelevanten Eigenschaften untersucht. Ziel war es, die Eignung der Materialien unter realitätsnahen Bedingungen nachzuweisen und die Auswirkungen der Verarbeitung zu bewerten.

Die Herstellung der Probekörper erfolgte daher bewusst unter Baustellenbedingungen. Untersucht wurden u. a.: Ausbreitmaß, Dichte, Schwindverhalten, Druckfestigkeit, E-Modul sowie Wassereindringwiderstand. [4]

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Grundlage für die vergleichende Bewertung der Materialien sowie für die Ableitung belastbarer Empfehlungen für die Praxis.

## Ergebnisse

Die Materialauswahl basierte auf normativ abgeleiteten Anforderungen, einer Marktanalyse und dem Vergleich mit Eigenschaften der Bestandsbetone. Drei Produkte wurden in Laborversuchen untersucht: zwei Zementsuspensionen (MasterRoc TIX 20 und MC Centricrete HCS) sowie der Vergussmörtel Pagel V1/50. Keines der auf dem Markt befindlichen Materialien sind für große Schichtdicken, wie sie bei der Instandsetzung von Hohlstellen benötigt werden, entwickelt. Die Versuche zeigten, dass alle Produkte grundsätzlich für die Verfüllung geeignet sind – jedoch mit unterschiedlichen Stärken. Die Zementsuspensionen erwiesen sich aufgrund ihrer hohen Fließfähigkeit als besonders geeignet für flache oder verzweigte Hohlstellen. Pagel V1/50 zeigte Vorteile in großen Hohlräumen und bei komplexen Wegigkeiten, da die Gesteinskörnung eine unkontrollierte Abwanderung verhindert.

Laboruntersuchungen (u. a. Ausbreitmaß, Druckfestigkeit, Schwindverhalten, E-Modul) lieferten ein konsistentes Gesamtbild: MasterRoc TIX 20 und Centricrete HCS weisen eine sehr hohe Fließfähigkeit auf, unterscheiden sich jedoch in der Rissanfälligkeit deutlich. Besonders das starke Schwinden und die ausgeprägte Rissbildung von Centricrete HCS machen dessen Einsatz bei Aufbauhöhen größer einiger Centimetern kritisch. Pagel V1/50 zeigte das geringste Schwindmaß und die geringste Rissbildung, allerdings bei eingeschränkter Fließfähigkeit und der hieraus resultierenden Notwendigkeit von sehr großer Packerdurchmesser.



Abb. 3: Schnittflächen TK1, 3, 5

Abbildung 3 zeigt die Schnittflächen von drei Testkörpern verpresst mit MC (links), MasterRock (Mitte) und Pagel (rechts). Insgesamt bestätigten die Schnittflächen und Bohrkern bei allen Materialien einen guten Verbund zur Innenschale, wobei in der Praxis geringere Verbundwerte zu erwarten sind.

Parallel zur Materialbewertung wurden Verfahren zur sicheren und vollständigen Instandsetzung entwickelt. Die Vorgehensweise orientierte sich an ZTV-ING [3] und TR-Instandhaltung [1][2], wurde jedoch aufgrund der Geometrie der Hohlstellen weiterentwickelt. Besonders wichtig sind: eine korrekte Packeranordnung (Abstände  $\leq 1$  m), das Verpressen vom tiefsten zum höchsten Punkt, der Einsatz von Entlüftungspackern, sowie das Vornässen zur Bestimmung des Hohlraumvolumens und zur Beurteilung möglicher Wegigkeiten. Die Versuche zeigten, dass eine kontrollierte Entlüftung entscheidend für den Verpresserfolg ist und der Verpressdruck kein hartes Abbruchkriterium sein kann.

Die entwickelten Verfahren haben sich in den 1:1-Modellen bewährt und bilden die Grundlage für eine Handlungsanleitung, die zukünftig in den Instandsetzungsprojekten der Stadtwerke München Anwendung finden wird. Die getesteten Materialien sind jeweils für bestimmte Hohlraumtypen geeignet; für eine vollständige Marktabdeckung können weitere Untersuchungen sinnvoll sein.

### Die wichtigsten Punkte

- Vergleichende Materialbewertung: Drei marktgängige Verfüllmaterialien wurden umfassend geprüft; dabei zeigte sich eine klare Eignungsdifferenzierung nach Hohlraumgeometrie, Schichtdicke und Wegigkeiten.
- Verfahrensentwicklung für die Praxis: Ein robustes, in der Praxis anwendbares Instandsetzungsverfahren wurde entwickelt – inkl. optimaler Packeranordnung, Entlüftungsstrategie und Vornässmethodik.

- Materialempfehlungen nach Hohlraumtyp: Für flache, verzweigte Hohlräume ist MasterRoc TIX 20 am geeignetsten; für großvolumige Hohlstellen bietet Pagel V1/50 deutliche Vorteile; MC Centricrete HCS erwies sich für größere Aufbauhöhen als kritisch.
- Evidenzbasierte Umsetzung: Die Ergebnisse fließen unmittelbar in die Instandsetzungsstrategie der Stadtwerke München ein und bilden die Grundlage eines belastbaren technischen Leitfadens für zukünftige Projekte

### Ausblick

Die Untersuchungen zeigen weiteren Forschungsbedarf insbesondere bei der Kraftübertragung in der Verbundfuge zwischen Innenschale und Verpresskörper. Aufgrund der oft ungenauen Lage der Bewehrung bleibt die messtechnische Erfassung und Verbesserung dieses Verbunds eine zentrale Herausforderung. Grundlage hierfür kann eine systematische Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit innerhalb der Hohlstelle sein.

Außerdem sollte das Materialverhalten bei Wasserzutritt und in den Hohlstellen vorhandenem Wasser weiter untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

### Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingung, 10.2022: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
- [2] Technische Regel, 05.2020: Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung) - Teil 1 - Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung
- [3] Technische Regel, 05.2020: Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung) - Teil 2 - Merkmale von Produkten oder Systemen für die Instandsetzung und Regelungen für deren Verwendung.
- [4] Normenreihe DIN EN 12390 – Prüfung von Festbeton sowie DIN EN 12350 – Prüfung von Frischbeton

### Autor

Hannes Venneklaas, Master of Engineering (M.Eng.)

#### Laufbahn (akademisch)

|                   |                                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 09/2013 – 07/2017 | Bachelor Landschaftsbau (Hochschule Osnabrück)        |
| 09/2017 – 02/2019 | Bachelor Baubetriebswirtschaft (Hochschule Osnabrück) |
| 10/2020 – 03/2025 | Master Bauingenieurwesen (Hochschule München)         |

#### Laufbahn (beruflich)

|                   |                                                                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 08/2011 – 06/2013 | Berufsausbildung Gärtner Fachrichtung Garten- und Landschaftsbau Bernsen ART-Bau GmbH (Nordhorn) |
| 09/2015 – 01/2022 | Werkstudent und Projektingenieur Hermann Dallmann Straßen- und Tiefbau GmbH (Bramsche)           |
| 02/2022 – 07/2022 | Werkstudent Stadtwerke München GmbH (München)                                                    |
| 08/2022 – heute   | Projektleiter Stadtwerke München GmbH (München)                                                  |

### Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Labor für Baustoffe und Bauchemie  
Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule München, Professor Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt  
&  
M. Sc. Axel Albert (Stadtwerke München GmbH)

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**

# UNTERSUCHUNG DER MÖGLICHKEITEN IN IFC FÜR DIE PLANUNG UND MODELLIERUNG VON BAUPROZESSEN

## Masterarbeit

Anand Vijayan

In der aktuellen Baupraxis erfolgen Bauplanung und Terminierung vorwiegend in proprietären BIM Softwareumgebungen sowie in externen Terminierungstools wie MS Project und Excel. Obwohl 3D-Modelle zunehmend zur Visualisierung genutzt werden, werden die zugrunde liegenden Prozessinformationen wie Aufgaben (*IfcTask*), Terminpläne (*IfcWorkSchedule*) und Ressourcen (*IfcResource*) selten semantisch in offene BIM Modelle integriert. Infolgedessen sind Daten aus dem Bauprozess häufig an bestimmte Software gebunden, schwierig mit anderen Beteiligten auszutauschen und verfügen nur über eine begrenzte Interoperabilität. Obwohl sich der Industry Foundation Classes (IFC) Standard für den Datenaustausch im Building Information Modeling international etabliert hat, wurde sein Potenzial für die strukturierte Darstellung von Bauprozessen und Ressourcen bislang nur in begrenztem Umfang genutzt. Diese Studie untersucht daher, inwieweit das IFC 4.3 Schema für die IFC native und herstellerneutrale Modellierung von Bauprozessen genutzt werden kann. Zu diesem Zweck wurde ein automatisierter Workflow entwickelt, der ein BIM Modell auf Basis externer Planungsdaten systematisch mit Termin und Ressourceninformationen anreichert. Die Ergebnisse der Studie legen nahe, dass IFC Modelle nicht nur zur geometrischen Beschreibung von Bauwerken, sondern auch als zentrale Datenbasis für die prozessorientierte Bauplanung genutzt werden können. Diese Entwicklung eröffnet neue Möglichkeiten für automatisierte 4D-Simulationen, eine effiziente Ressourcenplanung und die Interoperabilität von Bauprozessdaten über verschiedene Softwareumgebungen hinweg.

**Keywords:** IFC, IfcOpenShell, OpenBIM, Bauprozessmodellierung, 4D-BIM, Interoperabilität, herstellerneutrale Arbeitsabläufe, Single Source of Truth (SSoT), Python

## Problemstellung

In der aktuellen Baupraxis findet sich häufig eine klare Trennung zwischen dem 3D-Gebäudemodell und der Bauplanung, die in Form von Gantt-Diagrammen oder Netzplänen organisiert wird. Diese Trennung resultiert in der

Praxis häufig in Inkonsistenzen, insbesondere bei Modifikationen des Bauablaufs oder des Modells. Darüber hinaus binden proprietäre 4D-BIM-Lösungen Anwender oft an spezifische Softwaresysteme, was einen herstellerneutralen Datenaustausch erschwert. Die Unterschiede zwischen den konventionellen Ansätzen der

Bauprozessmodellierung und einem IFC-nativen Ansatz werden in Abbildung 1 veranschaulicht. Obgleich herkömmliche 4D-BIM-Workflows zumeist auf geometriebasierten Simulationen basieren, erfolgt die Verwaltung von Prozessdaten in der Regel in separaten, proprietären Systemen. Dies resultiert in einer eingeschränkten Interoperabilität sowie einem erhöhten manuellen Aufwand für die Synchronisierung von Modellen und Terminplänen [1,6].

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit sich der herstellerneutrale IFC-Standard dazu nutzen lässt, Bauprozesse, Ressourcen und zeitliche Abhängigkeiten direkt innerhalb eines BIM-Modells abzubilden und damit eine automatisierte 4D-Simulation zu ermöglichen.

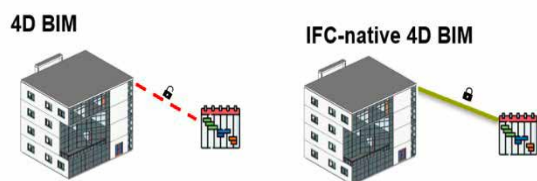


Abb. 1: Vergleich zwischen konventioneller und IFC-nativer Bauprozessmodellierung

## Konzeptentwicklung

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten des IFC-4.3-Schemas zur Modellierung von Bauprozessen, Aufgaben und Ressourcen auf IFC-native und herstellerneutrale Weise untersucht [2]. Das Ziel besteht darin, die in der Praxis häufig bestehende Trennung zwischen geometrischen BIM-Modellen und der Bauprozessplanung zu überwinden.

Der entwickelte Ansatz basiert auf der Integration von Informationen aus der Bauplanung in das BIM-Modell mittels standardisierter IFC-Entitäten, anstatt auf softwarespezifische Erweiterungen zurückzugreifen [3, 4]. Dadurch wird die Abbildung von Bauprozessen, zeitlichen Abhängigkeiten sowie Ressourcen innerhalb eines einheitlichen Datenmodells ermöglicht. Die grundlegende Struktur des IFC-nativen

Modellierungsansatzes ist in Abbildung 2 dargestellt.

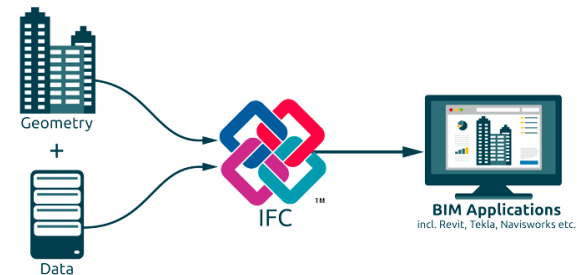
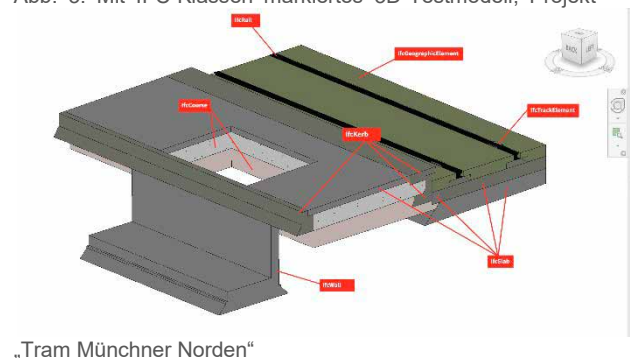


Abb. 2: IFC-native Methode zur Modellierung von Bauprozessen

Als Testprojekt wurde das laufende Infrastrukturprojekt "Tram Münchner Norden (TMN)" der Stadtwerke München GmbH verwendet [7]. Das Projekt umfasst den Bau mehrerer Straßenbahnhaltestellen sowie zugehöriger Infrastrukturelemente und zeichnet sich durch eine Vielzahl koordinierter Bauprozesse, temporäre Baustellenbedingungen und den Einsatz verschiedener Baumaschinen aus. Das Projekt eignet sich daher in besonderer Weise für die Untersuchung der prozessorientierten BIM-Modellierung, da neben permanenten Bauelementen auch temporäre Ressourcen und zeitliche Abhängigkeiten berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 3 wird das verwendete 3D-Testmodell des Projekts dargestellt, in dem die relevanten Bauelemente mithilfe geeigneter IFC-Klassen strukturiert modelliert wurden.

Abb. 3: Mit IFC-Klassen markiertes 3D-Testmodell; Projekt



„Tram Münchner Norden“

## Methodik

Zur Umsetzung des IFC-nativen Ansatzes wurde ein strukturierter Workflow entwickelt, mit dem Bauprozessinformationen herstellerneutral in ein BIM-Modell integriert werden können. Der Ablauf des entwickelten Workflows ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Als Eingabedaten dienen ein 3D-BIM-Modell sowie die zugehörigen Terminpläne aus der Bauablaufplanung. Zunächst werden die Export- und Modellierungseinstellungen des BIM-Modells sowie die Exportbestimmungen der Terminpläne überprüft, um eine konsistente Weiterverarbeitung der Daten sicherzustellen.

Im Folgenden wird die Modellentwicklung mithilfe eines skriptbasierten Ansatzes durchgeführt. Im Rahmen dieses Prozesses werden Bauprozesse, Aufgabenabhängigkeiten und Ressourceninformationen auf Basis externer Planungsdaten generiert und mittels standardisierter IFC-Entitäten direkt in das BIM-Modell integriert. Die Realisierung dieses Schrittes erfolgte unter Verwendung eines Python-basierten Frameworks in Kombination mit der Open-Source-Bibliothek IfcOpenShell.

Im Rahmen des vorliegenden Verarbeitungsschrittes wird ein prozessangereichertes, 4D-integriertes IFC-Modell generiert, in dem Bauelemente, Bauaufgaben und Ressourcen miteinander verknüpft werden.

Im Anschluss erfolgt eine Schema-Validierung des erzeugten IFC-Modells. Zu diesem Zweck wird das Modell unter Zuhilfenahme des buildingSMART-Validierungswerkzeugs geprüft, um die Konformität mit dem IFC-4.3-Schema sicherzustellen und potenzielle Inkonsistenzen im Datenmodell zu identifizieren [5].

Das validierte Modell kann anschließend in verschiedenen 4D-BIM-Programmen und IFC-Viewern interpretiert werden. Darüber hinaus ermöglicht die strukturierte Datenintegration eine weiterführende Analyse und Visualisierung, beispielsweise in Form von Gantt-Diagrammen oder Auslastungs-Heatmaps für Bauressourcen.

Abschließend erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse anhand von Testanwendungsfällen, um die praktische Anwendbarkeit des entwickelten IFC-nativen Workflows zu untersuchen.

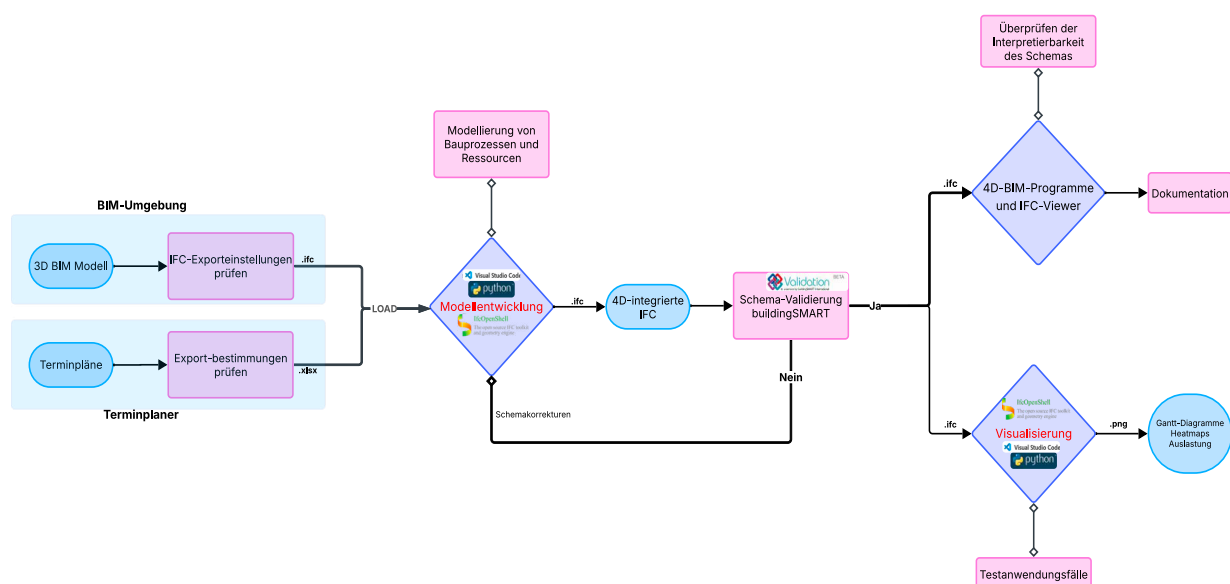


Abb. 4: IFC-native Methode zur Modellierung von Bauprozessen



## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Borrmann, A. et al. (2018): *Industry Foundation Classes: A Standardized Data Model for the Vendor-Neutral Exchange of Digital Building Models*. In: Building Information Modeling, pp. 81–126. Springer.
- [2]: Eastman, C. et al. (2011): *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, and Contractors*. 3. Auflage, John Wiley & Sons.
- [3]: Hamledari, H., McCabe, B., & Shahi, A. (2017): *Automated Schedule and Progress Updating of IFC-Based 4D BIMs*. In: Journal of Computing in Civil Engineering, 31(4).
- [4]: Huymajer, M. et al. (2024): *IFC concepts in the execution phase of conventional tunneling projects*. In: Tunnelling and Underground Space Technology, 143, 105368.
- [5]: ISO 16739-1:2024: *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema*. International Organization for Standardization.
- [6]: Kouhestani, S., & Nik-Bakht, M. (2020): *IFC-based process mining for design authoring*. In: Automation in Construction, 112, 103069.
- [7]: Überblick, Tram Münchner Norden Projekt: <https://tram-muenchner-norden.mvg.de/projekt.html>

## Autor, Coautoren

Anand Vijayan, MSc.

Laufbahn akademisch:

|           |                                                        |
|-----------|--------------------------------------------------------|
| 2016–2020 | Bachelorstudium Bauingenieurwesen, KTU, Kerala, Indien |
| 2022–2025 | Masterstudium M. Sc. Bauingenieurwesen, TU München     |

Laufbahn beruflich:

|                       |                                                              |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Nov.2022 - Mai.2024   | Werkstudent, Trumpf Scientific Lasers GmbH, München          |
| Sept.2024 – Nov.2024  | Praktikant, Dipl.-Ing. Bernd Gebauer Ingenieur GmbH, München |
| Jan.2025 – März.2025  | Praktikant, Stadtwerke München GmbH                          |
| April.2025 – Oct.2025 | Masterarbeit, Stadtwerke München GmbH                        |
| Seit Nov.2025         | Planungsingenieur, DB Engineering & Consulting, München      |

## Betreuer

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Computational Modeling and Simulation, TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München, Prof. Dr.-Ing. André Borrmann.

Betreuer:

Ina Heise, Dipl.-Ing. (Technische Universität München)  
 Martin Slepicka, M. Sc. (Technische Universität München)  
 Alaeddin Suleiman (Stadtwerke München GmbH)

**Die Arbeit wird mit dem 2. Preis ausgezeichnet.**

# REALISIERUNG EINER AUTARKEN BAUSTELLEN-EINRICHTUNG FÜR EINE NACHHALTIGE BAUSTELLE IM VERKEHRSWEGEBAU

## Bachelorarbeit

*Thomas Wieland*

**Der Baustellenbetrieb im Verkehrswegebau ist durch einen hohen Energiebedarf sowie lokale Emissionen von CO<sub>2</sub>, Lärm und Abgasen geprägt. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Vor diesem Hintergrund untersucht die Arbeit, unter welchen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen eine autarke Baustelleneinrichtung im Verkehrswegebau sinnvoll eingesetzt werden kann. Grundlage ist ein reales Pilotprojekt auf der Baustelle „Leerrohrtrasse Universität Augsburg“, bei dem eine autarke Baustelleneinrichtung im laufenden Tiefbaubetrieb erprobt wurde. Das Versorgungskonzept umfasste Photovoltaik, Batteriespeicher, einen Feststromanschluss sowie elektrisch betriebene Geräte und Maschinen. Auf Basis gemessener Betriebsdaten erfolgt eine vergleichende Bewertung gegenüber einer konventionellen Baustelleneinrichtung in technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Hinsicht. Die Ergebnisse zeigen, dass autarke Baustelleneinrichtungen unter geeigneten Rahmenbedingungen technisch zuverlässig betrieben werden können und insbesondere bei fehlendem Feststromanschluss deutliche Emissions- und Lärmminderungen ermöglichen.**

**Keywords:** Autarke Baustelleneinrichtung, Verkehrswegebau, nachhaltige Baustelle, Energieversorgung auf Baustellen, Photovoltaik, Batteriespeicher, Emissionsreduktion

## Einleitung

Der Verkehrswegebau steht vor der Herausforderung, steigende Nachhaltigkeitsanforderungen mit den betrieblichen Erfordernissen des Baustellenalltags in Einklang zu bringen [1–3]. Insbesondere im Tiefbau ist die Energieversorgung von Baustellen häufig durch Dieselaggregate geprägt, die mit hohen Treibhausgasemissionen, Lärmbelastungen und lokalen Schadstoffemissionen verbunden sind [4–6]. Gleichzeitig sind Baustellen meist zeitlich begrenzt, räumlich eingeschränkt

und nicht an das öffentliche Stromnetz angeschlossen [7, 8].

Diese Rahmenbedingungen erschweren die Integration alternativer Energieversorgungskonzepte erheblich und führen dazu, dass konventionelle Lösungen weiterhin dominieren. Parallel dazu verstärken regulatorische Vorgaben, steigende Energiepreise und gesellschaftliche Erwartungen den Druck, emissionsarme und ressourcenschonende Baustellenkonzepte zu entwickeln.

Insbesondere die zunehmende Elektrifizierung von Baumaschinen verändert die Anforderungen an die Energieversorgung grundlegend und erfordert leistungsfähige sowie flexible Versorgungssysteme. Gleichzeitig gewinnen Aspekte wie Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit im Baustellenbetrieb zunehmend an Bedeutung, da neue Konzepte nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch operativ zuverlässig sein müssen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob autarke Versorgungskonzepte einen praktikablen Beitrag zur nachhaltigen Weiterentwicklung des Baustellenbetriebs leisten können und unter welchen Rahmenbedingungen deren Einsatz sinnvoll ist.

### Konzeptioneller Hintergrund

Im Verkehrswegebau dominieren weiterhin konventionelle Baustelleneinrichtungen, die entweder über Dieselaggregate oder über temporäre Feststromanschlüsse versorgt werden [7, 9]. Der Einsatz erneuerbarer Energien sowie von Batteriespeichern beschränkt sich bislang überwiegend auf einzelne Pilotprojekte und ist noch nicht flächendeckend im Baustellenbetrieb etabliert [10, 11].

Parallel dazu gewinnt die ganzheitliche Betrachtung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte im Rahmen nachhaltiger Baustellenkonzepte zunehmend an Bedeutung [11–13]. Autarke Baustelleneinrichtungen besitzen das Potenzial, mehrere dieser Dimensionen gleichzeitig zu adressieren, etwa durch die Reduktion von Emissionen, Lärm und lokalen Umweltwirkungen [4, 5, 11]. Ihr Einsatz erfordert jedoch eine projektbezogene Bewertung der technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Leistungsfähigkeit.

### Methodik

Die Arbeit basiert auf der Analyse eines realen Pilotprojekts im Verkehrswegebau. Auf der Baustelle „Leerrohrtrasse Universität Augsburg“ wurde eine autarke Baustelleneinrichtung über mehrere Monate betrieben.

Das Energiesystem umfasste eine Photovoltaikanlage auf einem Containerdach (siehe Abb. 1), PV-Bauzaunmodule, einen Batteriespeicher sowie einen Feststromanschluss als ergänzende Versorgungssicherheit.



Abb. 1: Vogelperspektive der Containerdach-PV

Der Batteriespeicher war konzeptionell Bestandteil des Systems, konnte im Projektzeitraum jedoch nicht als serienreifes Gesamtsystem real betrieben werden. Die Bewertung basiert deshalb auf einer Kombination aus gemessenen Verbrauchsdaten und modellbasierten Hochrechnungen. Die energetischen Lastverläufe wurden rechnerisch über Flächenberechnungen von Rechtecken und Dreiecken sowie mithilfe der Trapezformel integriert (siehe Abb. 2). Auf dieser Grundlage wurde bestimmt, in welchem Umfang Energie durch den Speicher hätte zwischengespeichert werden können und welche Restenergie durch das Aggregat bereitzustellen gewesen wäre.

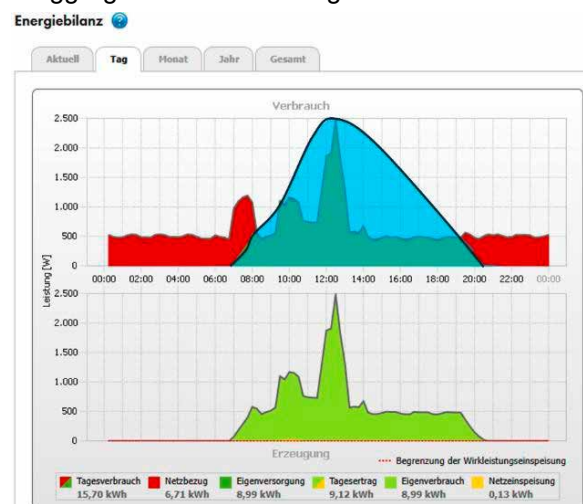


Abb. 2: konstruierte Energiebilanz Dach-PV + Speicher; hohe Sonneneinstrahlung

Zur Vergleichbarkeit werden drei Szenarien betrachtet:

- konventionelle Baustelleneinrichtung
- autarke Baustelleneinrichtung des Pilotprojekts
- optimierte autarke Variante ohne E-Radlader und mit baulich angepassten PV-Modulen

## Ergebnisse

**Technische Bewertung:** Die energetische Analyse zeigt, dass die Energieversorgung maßgeblich durch das Zusammenspiel von Photovoltaik, Speicher und Aggregat bestimmt wird. Beim untersuchten System wird der überwiegende Teil des Energiebedarfs durch das Aggregat gedeckt, während der photovoltaische Anteil bei rund 20 % liegt (Abb. 3).

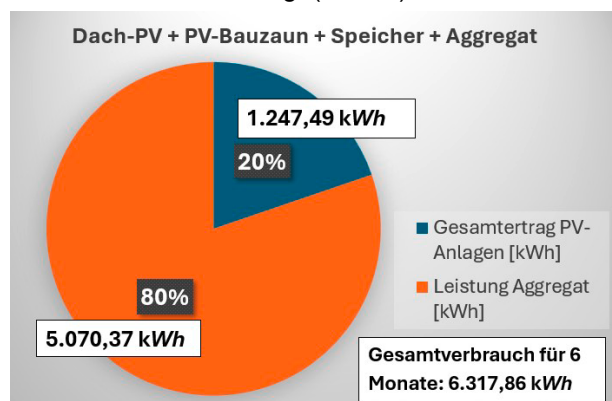


Abb. 3: Energieaufteilung Dach-PV + Speicher + Aggregat  
Die Aggregatlaufzeiten konzentrieren sich vor allem auf die Herbst- und Wintermonate (Abb. 4).

Aufteilung der Aggregatstunden  
(Dach-PV + Speicher + Aggregat)



Abb. 4: Aufteilung 6 Monate; Aggregatstunden (PV-Anlagen)

Diese saisonale Abhängigkeit ist im Wesentlichen auf das reduzierte photovoltaische Ertragspotenzial in sonnenärmeren Zeiträumen zurückzuführen.

Die modellbasierte Auswertung zeigt zudem, dass der Batteriespeicher zwar zur Glättung von Lastspitzen und zur zeitlichen Verschiebung von Energie beitragen kann, jedoch nicht ausreichend ist, um längere Phasen geringer PV-Erzeugung vollständig zu kompensieren. Der Aggregatbetrieb bleibt daher insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten weiterhin erforderlich, um eine durchgängige und betriebssichere Energieversorgung der Baustelle sicherzustellen.

**Wirtschaftliche Bewertung:** Die Kostenanalyse zeigt, dass die optimierte autarke Baustelleneinrichtung bei einer Bauzeit von fünf Monaten kostenmäßig leicht unter der Standard-Baustelleneinrichtung liegt (vgl. Abb. 5).

|                 | Monate |
|-----------------|--------|
| Gesamt          | 5      |
| Herbst/Winter   | 1      |
| Frühling/Sommer | 4      |

|             |             |
|-------------|-------------|
| Standard-BE | 25.597,86 € |
| Autarke BE  | 33.468,86 € |

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Standard-BE          | 25.597,86 € |
| Optimiert autarke BE | 25.355,21 € |

Abb. 5: Kostenanalyse auf 5 Monate

Auch bei einer Verlängerung auf sechs Monate bleiben die Mehrkosten gering und bewegen sich auf einem vergleichbaren Kostenniveau (siehe Abb.6).

|                 | Monate |
|-----------------|--------|
| Gesamt          | 6      |
| Herbst/Winter   | 0      |
| Frühling/Sommer | 6      |

|             |             |
|-------------|-------------|
| Standard-BE | 30.004,08 € |
| Autarke BE  | 39.453,91 € |

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Standard-BE          | 30.004,08 € |
| Optimiert autarke BE | 30.221,64 € |

Abb. 6: Kostenanalyse auf 6 Monate

Deutlich höhere Kosten weist die vollständig autarke Baustelleneinrichtung auf, die klar über den beiden anderen Varianten liegt. Maßgeblicher Kostentreiber ist der elektrisch betriebene Radlader.

**Ökologische Bewertung:** Der autarken Baustelleneinrichtung steht eine deutliche ökologische Wirkung gegenüber. Die CO<sub>2</sub>e-Bilanz zeigt eine Reduktion der betrieblichen Emissionen um rund 96 % pro Monat im Vergleich zur Standard-Baustelleneinrichtung (siehe Abb. 7). Die verbleibenden Emissionen resultieren ausschließlich aus dem aggregatgedeckten Restenergieeinsatz.

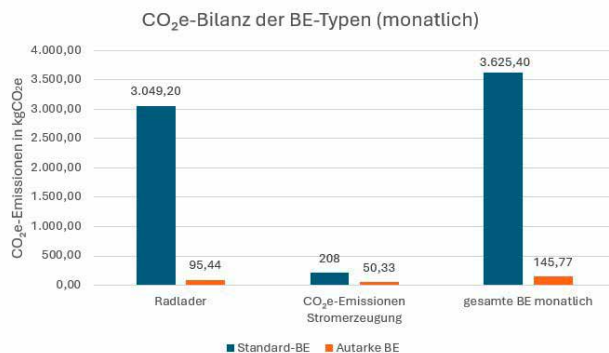


Abb. 7: CO<sub>2</sub>e-Bilanz jährlich (Standard-BE vs. autarke BE)  
Auch auf Geräteebe zeigt sich eine erhebliche Emissionsminderung, vor allem bei den Radladern.

**Soziale Bewertung:** Elektrisch betriebene Maschinen werden insbesondere aufgrund geringerer Lärmemissionen und verbesserter Luftqualität positiv wahrgenommen. Gleichzeitig bestehen Vorbehalte hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Reichweite einzelner Geräte. Eine hohe Akzeptanz erfahren mobile Batteriesysteme. Transparente Kommunikation und begleitende organisatorische Maßnahmen erweisen sich als entscheidend für die erfolgreiche Integration neuer Technologien in den Baustellenalltag (vgl. Abb. 8).



Abb. 8: Befragung Baustellenpersonal über gemeinsamen Austausch untereinander und mit AG

## Diskussion

Die Auswertung zeigt, dass autarke Baustelleneinrichtungen kein universelles Standardkonzept darstellen. Ihre Vorteilhaftigkeit ist stark von projektbezogenen Randbedingungen wie Bauzeit, saisonalem Energieangebot und den Leistungsanforderungen der Baustelle abhängig. Unter geeigneten Voraussetzungen können autarke Versorgungskonzepte jedoch einen relevanten Beitrag zur Reduktion von Emissionen sowie zur Verbesserung der Baustellenumwelt leisten.

Besonders deutlich wird der aktuelle Entwicklungsstand autarker Systeme im Verkehrswegebau an der notwendigen projektspezifischen Auslegung des Batteriespeichers. Durch die Kombination aus Messdaten und modellbasierter Hochrechnung lassen sich dennoch belastbare Aussagen zu Systemgrenzen und Einsatzpotenzialen unter realen Baustellenbedingungen treffen.

## Fazit

Autarke Baustelleneinrichtungen lassen sich im Verkehrswegebau unter geeigneten Rahmenbedingungen technisch umsetzen und weisen eine deutliche ökologische Wirkung auf. Gleichzeitig erfordert ihr Einsatz eine differenzierte, projektbezogene Betrachtung, um technische Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeitswirkung sinnvoll miteinander zu verknüpfen.

Mit den gewonnenen Ergebnissen steht der Baupraxis eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Verfügung, die aufzeigt, unter welchen Voraussetzungen autarke Baustelleneinrichtungen zielführend eingesetzt werden können (siehe Abb. 9).

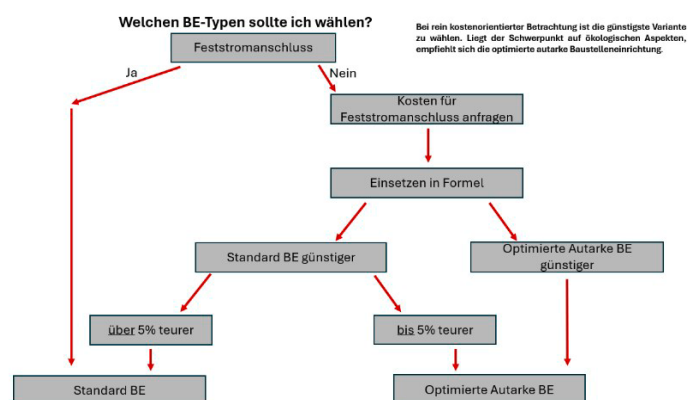


Abb. 9: Entscheidungshilfe für Baustelleneinrichtungstyp

## Literaturverzeichnis

### Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Die Bundesregierung (Hrsg.) (2025): *Ein Kompass für die Zukunft – Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Berlin.
- [2]: Europäische Kommission (Hrsg.) (o.J.): *Fit für 55 – Delivering the European Green Deal*. Brüssel.
- [3]: STRABAG SE (Hrsg.) (o.J.): *Nachhaltigkeitsstrategie und Strategie 2030*. Wien.
- [4]: Umweltbundesamt (Hrsg.) (o.J.): *Verkehr – Emissionen und Umweltwirkungen*. Dessau-Roßlau.
- [5]: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (o.J.): *Lärm – Gefährdungen für Gesundheit und Sicherheit*. Dortmund.
- [6]: Verbraucherzentrale (Hrsg.) (2024): *Ökodiesel HVO 100 – Informationen zum neuen Kraftstoff*.
- [7]: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (Hrsg.) (o.J.): *Baustellenbetrieb und Energieversorgung im Bauwesen*.
- [8]: STRABAG BMTI (Hrsg.) (o.J.): *Maschinen, Geräte und Baustellenlogistik*.
- [9]: Pramac (Hrsg.) (o.J.): *Mobile Stromerzeuger für Baustellen – Produktinformationen*.
- [10]: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hrsg.) (o.J.): *Energiesystemanalyse – Technoökonomische Bewertung*.
- [11]: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (Hrsg.) (o.J.): *System Nachhaltige Baustelle*.
- [12]: DGNB (Hrsg.) (o.J.): *Gesundheit und Soziales auf Baustellen*.
- [13]: Umweltbundesamt (Hrsg.) (o.J.): *Umwelt und Gesundheit*.

### Autor

Thomas Wieland

### Laufbahn akademisch:

2021-2023: Technische Hochschule Augsburg

Seit 2023: Ostbayrische Technische Hochschule Laufbahn

### beruflich:

2017-2020: abgeschlossene Ausbildung als IT-Systemelektroniker

Seit 2024: Werkstudent bei Strabag AG (Bayern Süd / Großprojekte Ost)

### Betreuer/-in

Die Arbeit wurde angefertigt am Lehrstuhl für Bauingenieurwesen, Ostbayrische Technische Hochschule Regensburg, unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Charlotte Thiel. Die fachliche Begleitung seitens der Praxis erfolgte durch Felix Galster und Anne-Sophie Streicher (STRABAG AG).

**Die Arbeit wird mit einer Urkunde  
über eine wissenschaftliche Anerkennung ausgezeichnet.**





ISBN 978-3-89650-600-9 // € (D)



9 783896 506009

