

# HOCH- SCHULPREIS

des Bayerischen Bauindustrieverbandes

2020

# Inhalt

## **Digitales Planen und Bauen**

Seite 4

Vorwort ..... 3

Automatisierte Konformitätsprüfung  
digitaler Bauwerksmodelle ..... 4

Integration von BIM und Umweltplanung ..... 6

Geometrische und topologische Kopplung  
von Eisenbahnsystemen ..... 8

## **Nachhaltiges Bauen**

Seite 10

Robuste Optimierung von Lastmanagement  
und Energieverbrauch ..... 10

Ökonomische und ökologische  
Lebenszyklusbetrachtung ..... 12

Abstraktion des Punktwolken-Skeletts ..... 14

## **Innovative Materialien und Konstruktionen**

Seite 16

Additive Fertigung von Betonstrukturen  
mit der Selective Paste Intrusion ..... 16

Design Tool for Extrusion Based  
Additive Manufacturing ..... 18

Bewehrungskonzepte bei der Extrusion  
von Leichtbeton ..... 20

Impressum ..... 22

# Die Bauindustrie Bayern gratuliert herzlich allen Preisträgern

Die Technische Universität München (TUM), speziell die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt sowie die Fakultät Architektur, pflegen seit jeher einen intensiven Austausch mit dem Bayerischen Bauindustrieverband e.V.. Dieser Diskurs zwischen Theorie und Praxis, den frischen Ideen und Forschungsprojekten der Studierenden und Promovierenden gepaart mit dem Know-How der erfahrenen Unternehmer ist sehr wichtig, um der Branche Impulse für die Zukunft zu geben.

Wir befinden uns in der glücklichen Lage die Spitzenforschung einer international beachteten Excellence-Universität vor der Haustür zu haben und möchten deshalb dem Nachwuchs der Branche umso mehr demonstrieren, dass seine Forschungsprojekte auch hierzulande große Anerkennung finden.

Deshalb freuen wir uns sehr, an jeweils drei wissenschaftliche Arbeiten der zukunftsweisenden Kategorien „Digitales Planen und Bauen“, „Nachhaltiges Bauen“, „Innovative Materialien und Konstruktionen“ den „Hochschulpreis der Bayerischen Bauindustrie“ zu verleihen.

Leider lässt es in diesem Jahr die Corona-Lage eine Honorierung der Preisträger im feierlichen Rahmen nicht zu. Umso wichtiger ist es uns, mit der vorliegenden Broschüre die diesjährigen Preisträger und deren hervorragende wissenschaftliche Arbeiten zu würdigen.

Zudem bedanken wir uns sehr herzlich bei der hochkarätig besetzten Jury aus Professoren der Ingenieurs fakultät Bau Geo Umwelt sowie der Fakultät Architektur.

Die Bauindustrie Bayern gratuliert herzlich allen Preisträgern.

Mit besten Grüßen



**Thomas Schmid**

Hauptgeschäftsführer | Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

## **Automatisierte Konformitätsprüfung digitaler Bauwerksmodelle**

Wie in vielen Fachgebieten dienen auch im Bauwesen Normen, Richtlinien und Technikstandards dazu, Mindestanforderungen festzulegen, die zum Schutz der öffentlichen Gesundheit, Sicherheit und des nachhaltigen Ressourcenschutzes in der bebauten Umwelt erforderlich sind. Da sich diese Vorschriften auf unterschiedliche Lebensphasen und fachspezifische Leistungsmerkmale eines Bauwerks beziehen, gibt es eine enorme Anzahl von Regelwerken und Richtlinien. Aktuell ist der Konformitätsprüfungsprozess mühsam, umständlich und fehleranfällig, da dieser zumeist manuell auf Basis der zweidimensionalen Planung und iterativ bei jeder Planungsänderung durch den zuständigen Planungsingenieur und die Baugenehmigungsbehörde durchgeführt werden muss. Eine Automatisierung dieses Prozesses mithilfe digitaler Methoden verspricht, den Arbeitsaufwand und somit die Kosten zu reduzieren. Gleichzeitig soll die Fehleranfälligkeit minimiert und der Planungsingenieur von monotoner, iterativer Arbeit befreit, so dass dieser mehr Zeit für wesentliche, kreative Tätigkeiten hat.

Die BIM-Methode sieht den konsequenten Einsatz digitaler Bauwerksmodelle über den gesamten Lebenszyklus einer gebauten Anlage hinweg vor. Diese Modelle beinhalten sämtliche Informationen zu dem Bauprojekt und daher bietet sich bei der digitalen Bauplanung das enorme Potential, die Prüfung der Konformität der Planung hinsichtlich regulatorischer Anforderungen zu automatisieren. In diesem Zusammenhang stellt die Arbeit die visuelle Programmiersprache Visual Code Checking Language (VCCL) vor, die es Architekten und Ingenieuren erlaubt, die Prüfprozesse selbst zu formalisieren und so schließlich auch zu automatisieren. Visuelle Programmiersprachen stellen im Gegensatz zu textuellen Programmiersprachen die beschriebenen Verarbeitungssysteme graphisch und somit besser verständlich für Anwender, die über keine oder aber geringe Programmierkenntnisse verfügen, dar.

## Fazit

Die VCCL wurde prototypisch in einem Demonstrator implementiert und kann für die Formalisierung von praktischen Anwendungen genutzt werden. Um die Sprache hinsichtlich ihrer Ausdruckskraft und Eignung für die Formalisierung von regulatorischen Anforderungen zu untersuchen, wurden Ausschnitte nationaler Normen ausgewählt und mit Hilfe der VCCL kodiert. An diversen Fallbeispielen konnte gezeigt werden, dass die Übersetzung und somit eine Automatisierung der Prüfprozesse umgesetzt werden kann.

## Ausblick

In der Arbeit wird die zunehmend essenzielle Rolle der Modellprüfung im Kontext des Building Information Modeling ausführlich dargestellt. Eine Automatisierung der Konformitätsprüfung hinsichtlich geltender regulatorischer Anforderungen rückt folglich zunehmend in den Fokus. Das Konzept zu der VCCL leistet als Werkzeug für Architekten und Ingenieure einen wegweisenden Beitrag und kann für weitere Anwendungsfälle in Zukunft ausgebaut werden.

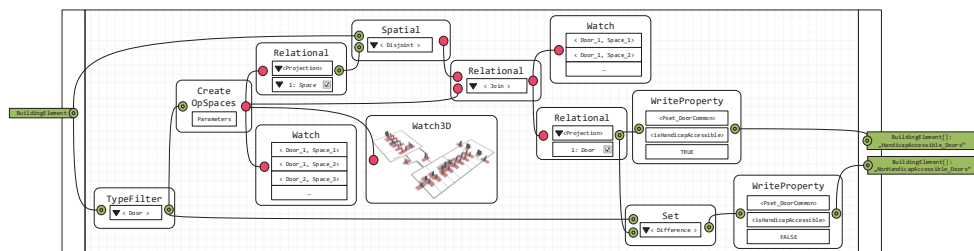
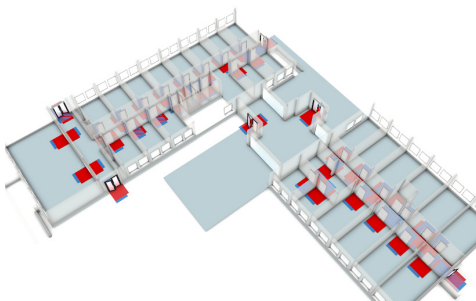
## Profil

Dr. Cornelius Preidel

Lehrstuhl für Computergestützte  
Modellierung und Simulation

[cornelius.preidel@tum.de](mailto:cornelius.preidel@tum.de)

[bit.ly/2JcI5rA](https://bit.ly/2JcI5rA)



# Integration von BIM und Umweltplanung

In der Masterarbeit wird ein Konzept erarbeitet, das unter den Rahmenbedingungen der Deutschen Bahn eine Integration von BIM und Umweltplanung ermöglicht. Die Integration erfolgt auf Basis der standardisierten Datenmodelle IFC und CityGML. Die Daten der technischen Planung und Umweltplanung werden zentral in einer Datenbank gespeichert und mittels Abfragen über die Projektgrenzen hinaus verfügbar gemacht.

In einer Anforderungsanalyse werden neben einer Literaturrecherche Fachgespräche mit Experten der Deutschen Bahn geführt. Ein Vergleich verschiedener Datenmodelle (CityGML, IFC, INSPIRE, LandInfra, XPlanung, OKSTRA) bezüglich den konkreten Anforderungen der Umweltplanung zeigt, dass sich CityGML sehr gut eignet, um mit den relevanten Umweltfachdaten ergänzt zu werden.

Zur Modellierung der Daten wird im Rahmen der Arbeit die Environmental Planning Application Domain Extension (EnvPlan-ADE) für CityGML entwickelt. Basisdaten und Fachdaten, wie Kartierungen, Konflikte und Maßnahmen werden in entsprechenden Klassen abgebildet, wobei insbesondere eine angemessene Repräsentation der Dimension Zeit berücksichtigt wird.

Zur Validierung des Konzepts wird ein Projekt der Eisenbahninfrastruktur herangezogen. Es wird gezeigt, dass sich alle relevanten Planungsdaten erfolgreich nach CityGML transformieren lassen und so ein integrierte Datenumgebung für BIM und Umweltplanung realisiert werden kann. Die CityGML-Daten werden anschließend in die Software 3DCityDB, eine Open Source Software zur Verwaltung digitaler 3D-Stadt- und Landschaftsmodelle, importiert. Die implementierten Datenbankabfragen zeigen zum Beispiel die Extraktion von Daten für die Erstellung eines Bauzeitenplans und Berücksichtigung der zeitlichen Beschränkungen der Umweltplanung oder die Durchführung einer Kompensationsberechnung unter Berücksichtigung der Daten aus der Ingenieurplanung.

## Fazit

Anhand eines Projektes der Eisenbahninfrastruktur wird gezeigt, dass sich alle relevanten Planungsdaten erfolgreich nach CityGML transformieren lassen und so ein Gesamtmodell der BIM- und GIS-Daten möglich ist. Mit der Verwendung von CityGML und der EnvPlan-ADE steht eine Plattform zur Verfügung, die alle projekt-relevante Daten an einem Ort vereint und über Abfragen die benötigten Informationen abgerufen werden können. Dadurch ist die Integration von BIM und Umweltplanung in 4D ermöglicht.

## Ausblick

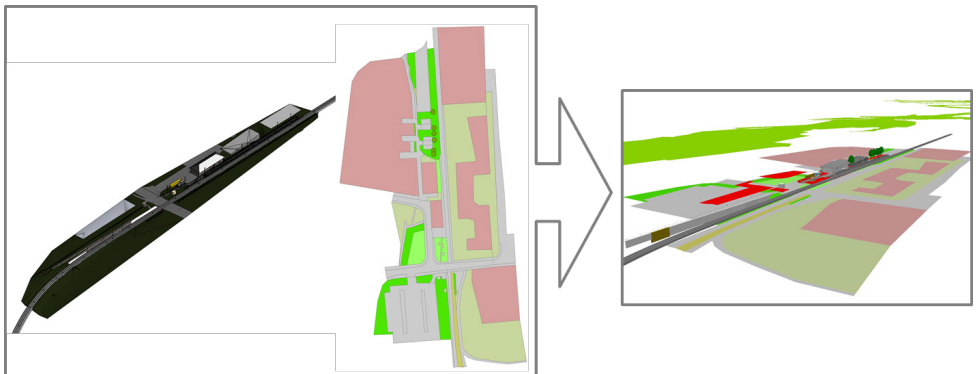
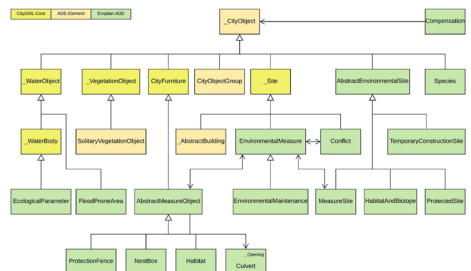
Die EnvPlan-ADE ergänzt CityGML und definiert ein Fachmodell für die Umweltplanung. Diese ist ein interdisziplinärer Arbeitsbereich, der auf Daten verschiedener Fachbereiche und Behörden zugreift. Diese Bereiche sollten ebenfalls in CityGML abgebildet und weitere ADEs als Fachmodelle für anderer Gewerke entwickelt werden. Das Zusammenspiel der verschiedenen ADEs ermöglicht ein ganzheitliches Datenmodell und damit ein BIM-Gesamtmodell.

## Profil

Laura Wilhelm

Lehrstuhl für Geoinformatik, TUM

[laura.wilhelm@tum.de](mailto:laura.wilhelm@tum.de)



## Geometrische und topologische Kopplung von Eisenbahnsystemen

Building Information Modelling (BIM) hat sich im Gebäudebereich bereits als Best-Practice-Ansatz etabliert, steht aber im Infrastrukturbereich noch am Anfang. Jüngste Bestrebungen, die Integration von BIM in großen Infrastrukturprojekten voranzutreiben, zielen auch auf den Bau und Betrieb von Eisenbahnnetzen. Die bestehenden Methoden sind jedoch nicht einheitlich implementiert, was zu möglichen Informationsverlusten führen kann.

Es gibt Datenaustauschschemata um den Informationsfluss zu vereinfachen, aber sie sind weder für Eisenbahnen optimiert, noch gibt es einen gemeinsamen Standard. Industry Foundation Classes (IFC) fügte vor kurzem das Konzept eines linearen Referenzsystems für Infrastrukturanlagen hinzu, welches aber nur auf die Geometrie fokussiert ist. Railway Markup Language (railML) ist ein Datenaustauschschema, das auf die Bereitstellung von Topologie für den Bahnbetrieb fokussiert ist, jedoch keine vollständige Unterstützung von Geometriedaten bietet. In dieser Arbeit wurde ein prototypisches Werkzeug entwickelt, das diese beiden Schemata miteinander verbindet, um konsistente Daten sowohl in der geometrischen als auch in der topologischen Darstellung zu gewährleisten.

Die geometrischen Objekt- und Elementsätze von IFC und railML weisen genügend Überschneidungen auf, um einen konsistenten Datenaustausch zu unterstützen. Der Austausch von topologischen Daten ist jedoch z. B. hinsichtlich des in railML gespeicherten Netzes eingeschränkt, da IFC noch keine Objekte besitzt, die die Trassenbeziehungen beschreiben. Der entwickelte Prototyp erlaubt es, aus einer railML-Datei eine einfache Gleisgeometrie von Grund auf zu rekonstruieren, verliert aber nach der Übergabe an IFC die Beziehungsinformationen sowie die Objekttaggregation. Umgekehrt kann die IFC-Geometrie einigermaßen gut nach railML konvertiert werden, aber der Benutzer muss die Navigierbarkeit zwischen den Achsen manuell festlegen.



## Fazit

Im Vergleich zum Datenaustausch nur innerhalb einer einzelnen Domäne, schließt das entwickelte Werkzeug die Lücke zwischen geometrischen und topologischen Darstellungen. Das Werkzeug vereinfacht den Datentransfer, vervollständigt fehlende Informationen mit minimalem Datenverlust und sorgt für zukünftige Erweiterbarkeit, um die produktive Zusammenarbeit und Interoperabilität in Eisenbahninfrastrukturen unter Verwendung des BIM-Prozesses zu verbessern.

## Ausblick

Obwohl zukünftige IFC-Erweiterungen, wie IFC Rail, Objekte für eine topologische Darstellung einbeziehen könnten, unterscheidet sich weiterhin das Konzept der Streckentopologie von dem in railML. Abgesehen von der technisch bedingten Dateninkonsistenz ist damit auch die verfahrensbedingte Dateninkonsistenz noch nicht gelöst. Ein Werkzeug, das den identischen Zustand von geometrischen und topologischen Darstellungen überprüfen kann, könnte solche Probleme abmildern.

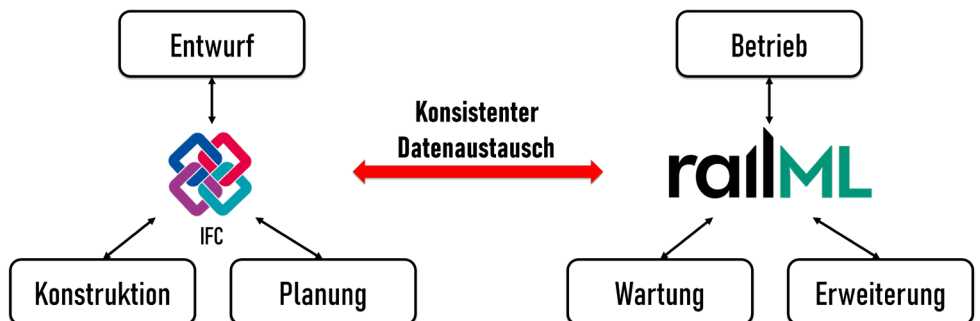
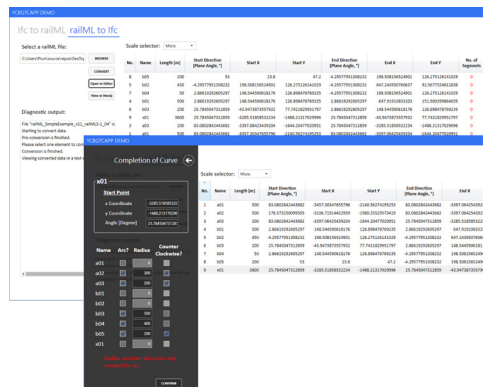
## Profil

Ya-Chun Bollig

**Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation,  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt,  
Technische Universität München**

ycwbollig@gmx.de

[bit.ly/3plc3rA](https://bit.ly/3plc3rA)



## **Robuste Optimierung von Lastmanagement und Energieverbrauch**

Die Zunahme erneuerbarer Energien im deutschen Stromnetz stellt die Netzbetreiber vor große Herausforderungen. Volatile Energieerzeuger erfordern Regel- und Speicherkapazitäten, die vermehrt durch Speicher im Ausland und fossile Regelernergie bereitgestellt werden müssen. Sogenanntes Lastmanagement, also die Regelung der Stromabnahme großer Verbraucher nach den Netzerfordernissen, stellt hierzu eine Alternative dar. Erste Studien weisen ein großes theoretisches Lastmanagementpotential in strombasierten Heiz- und Kühlsystemen im Gebäudesektor nach. Für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis fehlten bislang noch konkrete Strategien zum optimierten Einsatz von Lastmanagement im Gebäudebestand. Das Ziel der Masterarbeit war es deshalb, optimierte Sanierungsstrategien mit Fokus auf Lastmanagementpotential und Energieverbrauch zu finden. Mittels einer neu entwickelten, vollfaktoriellen und robusten Optimierungsmethodik konnten konkrete Sanierungsstrategien für Wohngebäude im Bestand erstellt werden. Die Ergebnisse basieren auf mehr als 200.000 Simulationen, welche die einflussreichsten Parameter unter Betrachtung von sieben Unsicherheitsszenarien, wie beispielsweise Klimawandel und Nutzerverhalten, abdecken.

Durch die entwickelten Sanierungsstrategien kann eine Steigerung des Lastmanagementpotentials von bis zu 122 % bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs um 56 % erreicht werden. Die Simulation von 216.160 Varianten machte neue Simulations- und Auswertungsprozesse erforderlich. Zur Umsetzung dieser Studie wurde ein von Grund auf neuer Simulationsablauf in Python implementiert, der mittels Parallelisierung die Simulationszeit des thermisch dynamischen Simulationsprogramms TRNSYS um 82 % reduzierte. Statt einer Dauer von 35 Tagen musste dementsprechend nur 4 Tage lang simuliert werden. Aufgrund der generierten Datenmenge von nahezu einem Terabyte wurde zur Auswertung auf Big Data Analytics Methoden zurückgegriffen. Zudem entstanden im Rahmen der Arbeit ein Monitoring-Tool zur Remote-Überwachung von Simulationen in einem Web-Interface sowie ein Programm zur interaktiven Analyse der Daten.

# Fazit

Das Ziel war es, robuste Sanierungsstrategien mit Fokus auf Lastmanagementpotential und Energieverbrauch zu definieren. Mittels einer vollfaktoriellen, robusten Optimierung konnten konkrete Sanierungsstrategien für Wohngebäude im Bestand erstellt werden. Die Ergebnisse basieren auf mehr als 200.000. Simulationen und knapp einem Terabyte an Daten. Die optimierten Sanierungsstrategien können das Lastmanagementpotential um bis zu 122 % steigern bei gleichzeitiger Halbierung des Energiebedarfs.

# Ausblick

Eine Modellrechnung ergab, dass bereits eine potentielle Sanierung und Elektrifizierung von 10 % des Wohngebäudealtbaubestandes (gebaut vor 1978) nahezu die 8-fache Speicherkapazität aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke bietet, wobei der Stromverbrauch des Haushaltssektors um lediglich 1% ansteigen würde. Weiterführend bedeutet dies, dass die Gebäude durch die Minderung ihres Energieverbrauchs nicht nur einen passiven Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion des Gebäudesektors liefern, sondern durch ihre Speicherkapazität aktiv einen Beitrag zur Energiewende leisten.

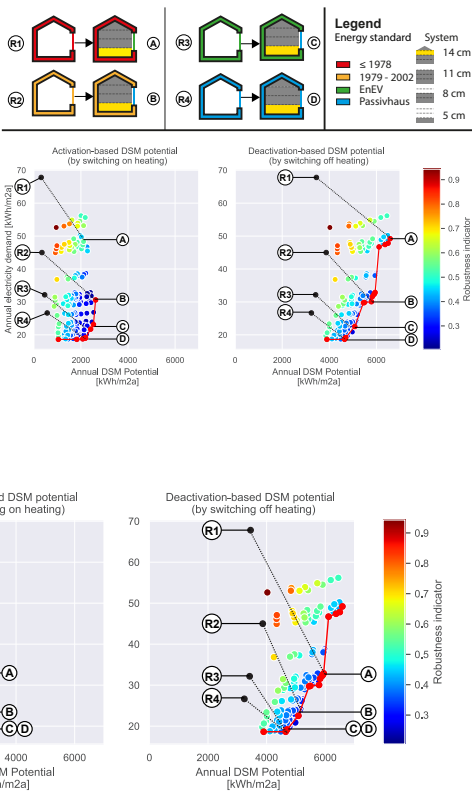
# Profil

Martin Gabriel

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

[kontakt@gabriel-martin.de](mailto:kontakt@gabriel-martin.de)

[gabriel-martin.de](http://gabriel-martin.de)



# Ökonomische und ökologische Lebenszyklusbetrachtung

Lebenszykluskosten (LCC) und Ökobilanzierungen (LCA) bieten eine Möglichkeit ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit im Bausektor zu quantifizieren. Diese Methoden sind derzeit aber selten Teil der Gebäudeplanung, sondern werden überwiegend für Nachhaltigkeitszertifizierungen oder in Forschungsprojekten angewandt. Außerdem werden sie derzeit nur getrennt angewendet, für eine gemeinsame Optimierung im Sinne der Nachhaltigkeit sollten sie aber zusammen betrachtet werden. Ziel der Arbeit war es daher die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen LCA und LCC in den Methoden und Ergebnissen zu erläutern und eine Orientierungshilfe für zukünftige gemeinsame Betrachtungen zu schaffen. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt Stellschrauben für Bauherren und Planer, mit denen ökonomisch und ökologisch Einsparungen im Lebenszyklus erzielt werden können.

Die Methoden wurden auf der Grundlage einer Literaturrecherche verglichen, die sich vor allem auf die Zertifizierungssysteme der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) und dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) bezieht. Anhand eines Beispielprojektes wurden Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen ermittelt, ausgewertet und miteinander verglichen. Dabei wird gezeigt, welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Methoden bestehen und wie sie sich auf das Ergebnis auswirken.

LCA und LCC verfolgen beide einen lebenszyklusorientierten Ansatz mit dem Ziel ökologische oder ökonomische Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu minimieren. Unterschiede liegen beispielsweise in den verschiedenen berücksichtigten Lebenszyklusphasen, Bewertungsindikatoren und Datenbezügen. Außerdem wird die Diskontierung, die eine Wertänderung im Zeitverlauf ermöglicht, derzeit nur in der LCC angewendet. Zu den Potentialen einer gemeinsamen Betrachtung zählen die Identifizierung von Wechselwirkungen, sowie Vermeidung von Doppelarbeit und Fehlerquellen, sodass eine praktische Anwendung der Methoden attraktiver wird.

## Fazit

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass trotz der Unterschiede eine gemeinsame ökonomische und ökologische Betrachtung im Sinne der Nachhaltigkeit Synergien identifizieren kann. Das ökonomisch und ökologisch größte Optimierungspotential ist der Energieverbrauch im Betrieb (Abb. 2). Unter den funktionalen Kategorien nimmt ökologisch betrachtet das Tragwerk, und ökonomisch der Innenausbau den größten Anteil ein (Abb. 3), welche daher bei Planungen besonders berücksichtigt werden sollten.

## Ausblick

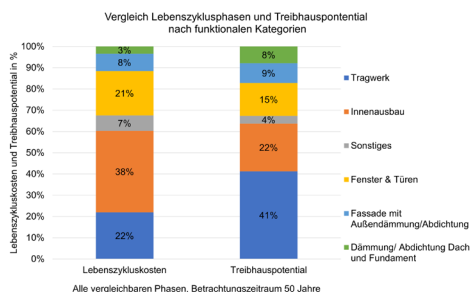
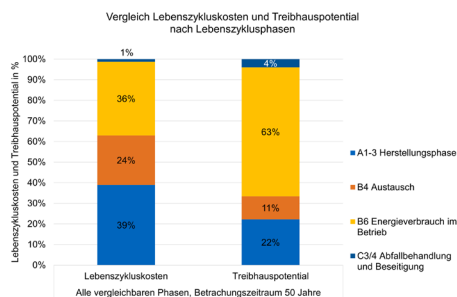
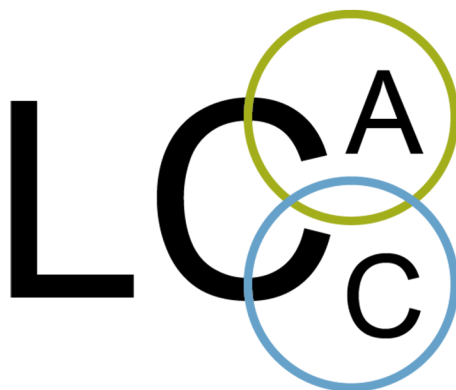
In Zukunft sollte die Bewertung von Nachhaltigkeitsfaktoren enger miteinander verbunden werden, damit Wechselwirkungen und Synergien zwischen den verschiedenen Aspekten sichtbar werden. Außerdem muss mehr über die lebenszyklusorientierten Methoden informiert werden und Anreize geschaffen werden, die Berechnungen in die Planung zu integrieren. Denn durch die Lebenszyklusplanung können nachhaltige Konzepte identifiziert werden, die in Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen werden.

## Profil

Anne Winkelkotte

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

[annewinkelkotte@gmail.com](mailto:annewinkelkotte@gmail.com)



# Abstraktion des Punktwolken-Skeletts

Living Root Bridges (LRBs) werden von lokalen Stämmen im indischen Bundesstaat Meghalaya aus Luftwurzeln des *Ficus elastica* gebaut. Um diese einzigartige Baukultur und die mechanische Struktur der Brücken zu verstehen, sollte Ingenieurwissen einfließen. Middleton (2019) bspw. hat einige dieser Brücken photogrammetrisch vermessen und großvolumige Punktwolkendaten erfasst. Diese Punktwolkenmodelle können nicht direkt für klassische Ingenieurberechnungen wie statische Analysen verwendet werden. Daher ist das Ziel dieser Studie erstens die Komprimierung der Punktwolkendaten und zweitens die Abstraktion topologischer Modelle der LRBs aus verrauschten Punktwolken.

Als erste Studie, die sich mit dieser Problematik befasst, werden lebende Wurzelbrückenabschnitte, die aus einer Vielzahl von Abzweigkonfigurationen bestehen, als Testmodelle verwendet, bevor die Methode auf eine ganze Brücke hochskaliert wird. Der endgültige Arbeitsablauf besteht aus: 1) Initialisierung der Rotation der Punktwolke durch eine Hauptkomponentenanalyse (PCA); 2) Voxelisierung der Punktwolke mit einer bestimmten Auflösung; 3) Bearbeitung des Voxelmodells einschließlich Löschen von Ausreißern und Füllen des hohlen Stammlochs; 4) Ausdünnen des Voxelmodells zu einem ein Voxel dicken Skelett; 5) Segmentierung der Äste durch Identifizierung der Gelenke.

Das Ergebnis ist ein topologisches Skelettmodell der lebenden Wurzeläste. Die Qualität des Ergebnisses wird im Hinblick auf verschiedene Möglichkeiten der Modellrotation, -abweichung und -wiederherstellung analysiert. Zwei mögliche Anwendungen des topologischen Modells werden angesprochen und getestet: Formbeschreibung und Wachstumsprognose.

# Fazit

In dieser Studie wird ein automatisiertes Programm (unter bestimmten Qualitätsbedingungen) zur Extraktion eines Astskeletts aus photogrammetrischen Punktwolken von LRB-Abschnitten realisiert. Der gesamte Vorgang besteht aus der Initialisierung der Punktwolke, der Voxelisierung, der Verarbeitung der Voxel, der 3D-Ausdünnung der Voxel und der Segmentierung der Äste. Die Qualität des topologischen Skelettmodells wird analysiert.

# Ausblick

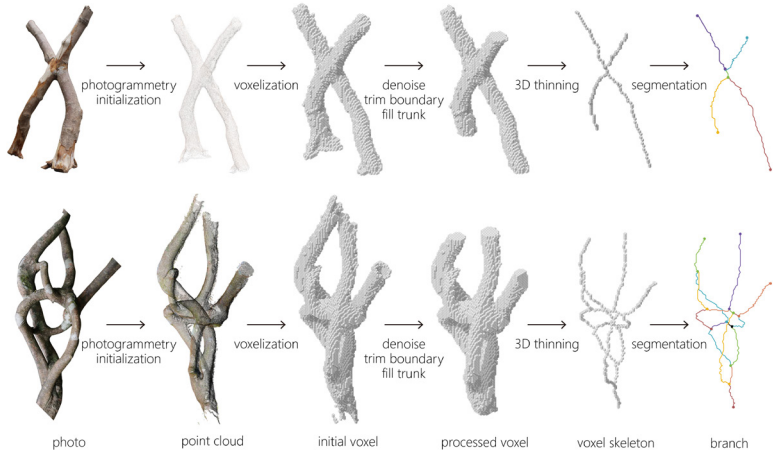
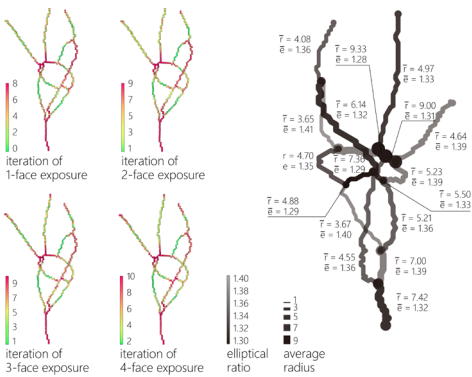
Ein großer Umfang dieser Studie ist die Entwicklung eines automatisierten Programms zur Abstraktion der topologischen Struktur für ein ganzes LRB, das für die statische Analyse verwendet werden könnte. Verbesserungen sind erforderlich in Bezug auf die Erfassung eines rauscharmen, vollständigen Punktwolkenmodells (z. B. unter Verwendung von LiDAR SLAM), Voxel-Retrieval in Octree zur Förderung der Berechnungseffizienz.

# Profil

**Qiguan Shu**  
**Lehrstuhl Green Technologies  
in Landscape Architecture**

[qiguan.shu@tum.de](mailto:qiguan.shu@tum.de)

[bit.ly/34FDfck](https://bit.ly/34FDfck)



# Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion

In Zeiten aufkommender Ressourcenknappheit an geeigneten Sanden für die Betonproduktion und aufgrund des hohen Energiebedarfs sowie CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der Zementproduktion bzw. der Bauindustrie kann durch die Anwendung formoptimierter Konstruktionsprinzipien ein hohes Maß an Einsparung von Baumaterial erreicht werden (40 – 70 Vol.%). Diese Produktionsprinzipien resultieren jedoch meist in komplexen Geometrien, die mit konventionellen Bautechniken wie geschaltem Beton nur schwer oder gar nicht realisierbar sind.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung formoptimierter und komplexer Bauteile bietet jedoch die Selective Paste Intrusion (SPI). Bei der SPI werden Schichten von Gesteinskörnung ausgebracht, die mit Zementleimen gebunden werden. Die SPI weist dabei mit Schichtstärken von  $3 \pm 2$  mm für den Bau ausreichend feine Oberflächenauflösungen auf. Für eine gute Festigkeit und Dauerhaftigkeit ist eine vollständige Durchdringung der Gesteinskörnungsschichten notwendig. Dies wird durch die Verwendung eines sehr fließfähigen Zementleims sowie eines Partikelbetts mit geringem Fließwiderstand ermöglicht. Jedoch kann dies auch zu einer schlechten Formtreue der Bauteile führen. Daher muss eine Anpassung der Rheologie des Zementleims an das verwendete Partikelbett erfolgen. In dieser Dissertation wurden dafür die materialtechnologischen sowie prozesstechnologischen Grundlagen und Zusammenhänge untersucht. Darüber hinaus erfolgte die Überprüfung von Zementleim-Partikelbett-Kombinationen bisher über aufwendige „Trial and Error“ Versuchsreihen. Dieses Vorgehen ist jedoch aufgrund des hohen Zeit- und Materialbedarfs vor allem bei Großgeräten unwirtschaftlich.

Aufgrund dessen wurden vier analytische Modelle zur Berechnung der Eindringtiefe des Zementleims in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften sowie der Eigenschaften des Partikelbetts hergeleitet bzw. entwickelt. Abschließend wurden die Materialeigenschaften von SPI-Bauteilen anhand von Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsversuchen ermittelt.



## Fazit

Die Ergebnisse zeigten, dass mittels SPI komplexe Bauteile mit hoher Festigkeit (Druckfestigkeit  $\leq 78$  MPa) und Dauerhaftigkeit (Frost-Tau(-salz), Karbonatisierung und Chlorid) mit isotropen Bauteileigenschaften herstellbar sind. Dazu kann mit den analytischen Modellen die Eindringtiefe mit einer Genauigkeit von 0,1 mm – 1,2 mm vorhergesagt und zukünftig auf „Trial and Error“ Versuche verzichtet werden. Abschließend wurde ein Leitfaden zur Anwendung der SPI in der Praxis entwickelt.

## Ausblick

Die guten Festbetoneigenschaften prädestinieren die SPI für eine Anwendung in der Praxis für die Additive Fertigung komplexer, ressourcensparender sowie formoptimierter Strukturen in Innen- und Außenbereichen. Als nächster Schritt ist eine möglichst kraftflussoptimierte Integration von Bewehrung zur Abtragung von Biegezugkräften notwendig. Dieses Ziel wird aktuell in einem Forschungsprojekt im Rahmen des TRR 277 (DFG) verfolgt, in dem Stahlbewehrung während der Produktion mit eingedruckt wird.

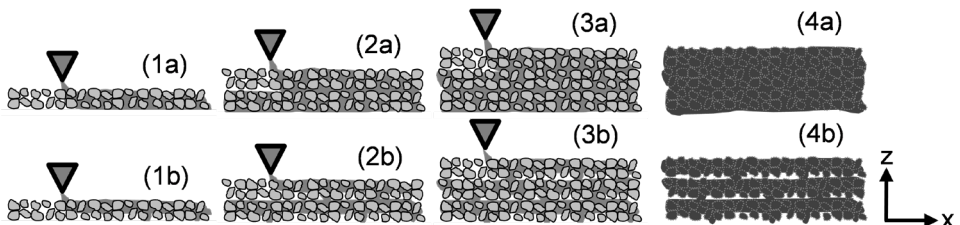
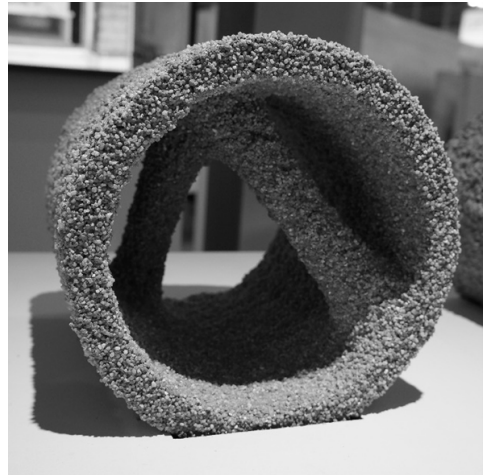
## Profil

Daniel Weger

Lehrstuhl für Werkstoffe und  
Werkstoffprüfung im Bauwesen

[daniel.weger@tum.de](mailto:daniel.weger@tum.de)

[bit.ly/3nKIAZ7](https://bit.ly/3nKIAZ7)



# Design Tool for Extrusion Based Additive Manufacturing

Gebäudehüllen erfüllen eine Vielzahl von Funktionen. Die Multifunktionalität aus beispielsweise Statik, Raumabschluss, Wärmedämmung und Ästhetik erfordert typischerweise Bauweisen mit mehreren aufeinanderfolgenden Schichten unterschiedlicher Materialien. Mit der Technologie der additiven Fertigung kann dagegen geometrische Freiheit dazu genutzt werden, zusätzliche Funktionen in Mono-Material Konstruktionen zu integrieren.

Diese Arbeit untersucht, wie geschlossene Zellstrukturen die thermischen Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen aus extrudiertem Leichtbeton beeinflussen können. In dieser Arbeit wird dazu ein Designwerkzeug entwickelt, welches die Gestaltung von Wandelementen mit internen Zellstrukturen ermöglicht. Die Geometrie der geschlossenen Zellen wird durch eine Sequenz von Vektoren als ein kontinuierlicher Pfad modelliert, sodass der Druck unterbrechungsfrei erfolgen kann. Material- und Prozessparameter wie Schichtumlaufzeiten und Überhänge werden dabei schon im Designprozess berücksichtigt, um die Stabilität der geometrischen Strukturen während dem Druckprozess zu gewährleisten. Das Design Tool ermöglicht es außerdem, funktionale Anforderungen durch lokal angepasste geometrische Eigenschaften graduell anzupassen. Die thermischen Eigenschaften der Bauteile können durch die Simulation des Wärmedurchgangs ebenfalls bereits während dem Designprozess abgeschätzt werden.

Die Machbarkeit der Entwicklung wird abschließend durch die experimentelle Fertigung von Demonstratoren im Maßstab 1:1 evaluiert.

## Fazit

Das physische Druckexperiment konnte die prinzipielle Machbarkeit von 3D-gedruckten, geschlossenen Zellstrukturen innerhalb von frei geformten Wandelementen aus extrudiertem Leichtbeton bestätigen. Im Vergleich zu einem massiven Wandelement konnte gezeigt werden, dass ein Wandelement mit inneren Zellstrukturen die gleiche wärmedämmende Funktion mit weniger Materialeinsatz erreichen kann.

## Ausblick

Mit der Weiterentwicklung der 3D-Druck Technologie, insbesondere im Hinblick auf höhere Druckauflösungen, könnten noch komplexere Geometrien mit kleineren Hohlräumen gedruckt werden, die dann auch die Anforderungen an gegenwärtige Baunormen erfüllen. Zusammen mit einer neuen Designsprache, könnten sich so in Zukunft funktional individualisierte Bauteile in Monostoffbauweise als Alternative zu konventionellen Mehrschichtbauteilen etablieren.

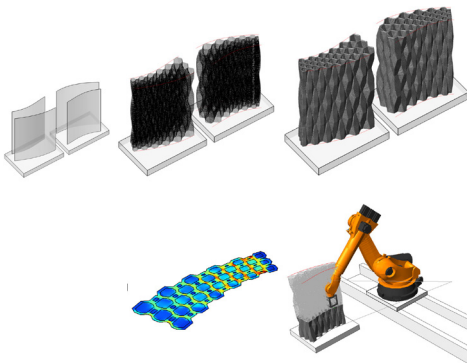
## Profil

**Fabian Jaugstetter**

**Lehrstuhl für Professur für  
Digitale Fabrikation**

[jaugstetter@me.com](mailto:jaugstetter@me.com)

[bit.ly/2KTBNMP](https://bit.ly/2KTBNMP)



# Bewehrungskonzepte bei der Extrusion von Leichtbeton

Additive Fertigungsverfahren, wie die Extrusion, gewinnen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Mit diesen computergesteuerten Verfahren ist es möglich Bauteile und Gebäude schnell, kostengünstig und automatisch im dreidimensionalen Raum und ohne Schalung zu fertigen. Um die Umsetzung von biegebeanspruchten Geometrien zu ermöglichen, müssen für den extrudierten Leichtbeton geeignete Bewehrungskonzepte gefunden werden.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Potentiale verschiedener Bewehrungskonzepte für die Extrusion von Leichtbeton zu bewerten sowie ihre Wirkungsweise und Integration in den Druckprozess zu analysieren. Dafür wurden verschiedene Untersuchungen mit mehreren Bewehrungsmethoden durchgeführt. Diese konnten in drei Konzepte unterteilt werden: Mikrofasern im Beton, horizontal eingelegte Bewehrung und vertikal eingesteckte Bewehrung. Für jeden Bewehrungsansatz wurden Probekörper aus Leichtbeton extrudiert und mit der jeweiligen Verstärkung versehen. Daraus wurden nach der Erhärtung Prismen unterschiedlicher Ausrichtung (horizontal und/oder vertikal) entnommen und auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit getestet. Die vertikale Bewehrung wurde zudem dem Pull-Out-Test unterzogen, um den Verbund zwischen Bewehrung und Leichtbeton bewerten zu können. Die verschiedenen Methoden der jeweiligen Konzepte wurden untereinander sowie mit einer Referenzmischung ohne Bewehrung verglichen und bezüglich ihrer Eignung für die Extrusion analysiert. Die deutlich höchsten Festigkeitsergebnisse erzielten Betonstähle als horizontale Bewehrung. Diese schränken jedoch, aufgrund ihrer begrenzten Formbarkeit, die Formfreiheit der Extrusion maßgebend ein. Eine gute Alternative stellen die Glasfaser-Rovings dar. Diese wiesen zwar ein geringere Biegezugfestigkeit auf, sind aber frei formbar und somit gut in den Druckprozess integrierbar. Die Mikrostahlfasern im Leichtbeton erreichten ebenfalls hohe Biegezugfestigkeiten. Die gewellten Drahtfasern als vertikale Bewehrung haben den Schichtenverbund sichtbar erhöht. Durch das händische Einbringen der Fasern entstanden allerdings größere Zeitlücken zwischen dem Extrudieren der Stränge, welche negative Auswirkungen auf den Verbund zwischen den Schichten hatten.

## Fazit

Durch diese Arbeit konnte zum einen gezeigt werden, dass mehrere Bewehrungskonzepte Potentiale für die Anwendung bei der Extrusion von Leichtbeton besitzen. Wobei die Eignung der Verstärkungsmethoden je nach geplanten Einsatzbereich variieren. Zum anderen konnte aufgezeigt werden, dass bei allen Bewehrungskonzepten eine maschinelle Einbringung der Bewehrung essenziell ist, um die Vorteile der Extrusion vollkommen ausschöpfen zu können.

## Ausblick

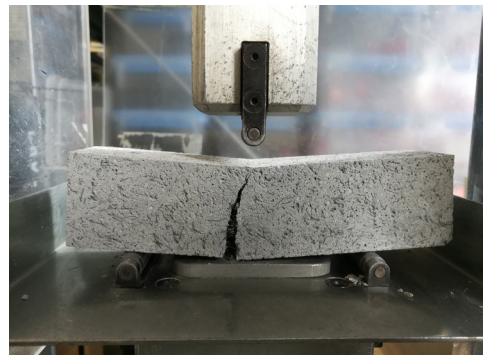
Um die Extrusion von Beton zukünftig in der Baubranche effizient einsetzen zu können, müssen weitere Entwicklungen und Forschungen in verschiedenen Bereichen stattfinden. Der Einsatz geeigneter Bewehrungsmethoden bei der Extrusion und deren Integration in den Druckprozess sind dabei ein wichtiges Thema, welches angehende Forschungen weiter vertiefen sollten. Zudem ist es unerlässlich, dass geeignete Technologien entwickelt werden, um das automatische und maschinelle Einbringen der Bewehrung zu ermöglichen.

## Profil

**Nadine Kofler**

**Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen**

**koflernadine@gmail.com**



# Impressum

## Ansprechpartner

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.  
Thomas Schmid  
info@bauindustrie-bayern.de  
+49 89 235003-12

Technische Universität München  
Fakultät für Architektur sowie  
Ingenieur fakultät für Bau Geo Umwelt

Abteilung Projektplattform Energie + Innovation  
Dipl.-Ing. Sandro Pfoh  
s.pfoh@ppe.tum.de  
+49 89 289-28153

## Gestaltung

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

## Herausgeber

Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)  
Oberanger 32  
80331 München  
www.bauindustrie-bayern.de

© BBIV, 1. Auflage, Dezember 2020



