



# **Building Information Modeling im Bestand**

Silke Dierssen

Mario Cichonczyk

Uwe Weitkemper

Dominic Becking

---



## Kurzbericht

*Anlage zum Abschlussbericht*

**Projekt: “Building Information Modeling im Bestand - Nachhaltige  
Lebenszyklusverlängerung von Bestandsbauwerken durch automatisierte  
Aufnahme und Analyse der Tragsysteme”**

Akronym: BIMiB Tragsystem  
Förderlinie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“  
im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“  
gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 13FH554IX6  
Projektaufzeit: 01.05.2019 - 31.10.2023  
Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf

Hochschule: Hochschule Bielefeld  
Campus Minden  
Artilleriestraße 9  
32427 Minden

Projektleiter: Prof. Dr. Dominic Becking

In dem Projekt "Building Information Modeling im Bestand - Nachhaltige Lebenszyklusverlängerung von Bestandsbauwerken durch automatisierte Aufnahme und Analyse der Tragsysteme", kurz "BIMiB", stand die Entwicklung innovativer Ansätze zur automatisierten Erkennung und Plausibilisierung von Tragwerksstrukturen aus Bestandsbauten im Zentrum. Ziel war es, die erfassten Daten in Standard-BIM-Software zu integrieren, um Umnutzungen und Revitalisierungen zu erleichtern, Kosten zu senken und die Wirtschaftlichkeit sowie Ausführungssicherheit zu erhöhen. Im Kontext des technischen und wissenschaftlichen Fortschritts knüpfte BIMiB an die zunehmende Bedeutung von Building Information Modeling an, die sich von der Konstruktion neuer Gebäude auf die Arbeit an Bestandsgebäuden ausweitet. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Weiterentwicklung und Verfeinerung des Scan2BIM-Prozesses gelegt.

Das Projekt gliederte sich in vier zentrale Forschungsstränge, die jeweils spezifische Aspekte des Themas adressierten und innovative Lösungsansätze entwickelten. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei der Integration von 2D- und 3D-Daten, der Analyse mit maschinellen Lernverfahren und der semantischen Kontextualisierung, um die Verarbeitungsgenauigkeit und Effizienz zu verbessern. In den Forschungsergebnissen des BIMiB-Projekts wurden Fortschritte in mehreren Schlüsselbereichen erzielt, die sich über die jeweiligen Forschungsstränge erstreckten:

- **Maschinelles Lernen in Scan2BIM:** Ein zentraler Forschungsstrang konzentrierte sich auf die Anwendung und Verbesserung von maschinellen Lernverfahren zur automatisierten Erstellung von BIM-Modellen aus Scan-Daten. Es wurde festgestellt, dass mit steigender Detailtiefe und Informationsdichte die Herausforderungen für ML-Modelle zunehmen, was spezifische Anpassungen und Entwicklungen erforderlich machte. Die Projektergebnisse umfassen verbesserte Algorithmen, die in der Lage sind, komplexere Datenstrukturen zu verarbeiten und genauere BIM-Modelle zu generieren.
- **Kognitive Prozesse und KI-Integration:** Ein weiterer Forschungsschwerpunkt lag auf der Integration von Erkenntnissen aus der Kognitionsforschung in KI-Anwendungen, um die Modellerstellung zu optimieren. Durch das Verständnis und die Simulation von menschlichen Wahrnehmungsprozessen und logischem Schließen konnten effektivere Algorithmen entwickelt werden, die den Modellierungsprozess verbessern und zu realitätsnäheren Ergebnissen führen.
- **Entwicklung einer Verarbeitungspipeline:** Das Projekt führte zur Entwicklung einer spezialisierten Verarbeitungspipeline, die eine effiziente und fehlerreduzierte Integration von 2D-Grundrisszeichnungen und 3D-Laserscans ermöglicht. Durch die Implementierung einer domänenpezifischen Heuristik konnte die Datenzusammenführung optimiert werden, was eine qualitativ hochwertige Basis für die weitere Modellierung schafft.
- **Evaluationsversuche und Praxistauglichkeit:** Wesentliche Ergebnisse umfassen auch die Durchführung von Evaluationsversuchen, die die Praxistauglichkeit der entwickelten Methoden und Modelle überprüften. Diese Tests, basierend auf realen Gebäudedaten und -scans, bestätigten die Effektivität der Ansätze und demonstrierten deren Anwendungspotenzial im BIM-Prozess.

Die Kooperation mit externen Projektpartnern ermöglichte einen umfangreichen Wissens- und Datenaustausch, der die Forschungsarbeit bereicherte und stets an praxisnahe Anforderungen knüpfte. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit war essentiell für die Validierung der Forschungsergebnisse und deren Übertragung in anwendbare Lösungen. Die Industriepartner HOCHTIEF ViCon GmbH und Pape Architekten AG trugen maßgeblich zur Konzeption und Realisierung des Vorhabens bei. Diese kooperative Atmosphäre ermöglichte einen offenen Ideenaustausch und die gemeinsame Entwicklung von Lösungen, die sowohl wissenschaftliche Erkenntnisse vertieften als auch praktische Anwendungen im Bauwesen vorantrieben.

Das BIMiB-Projekt stellt in seiner Gesamtheit einen bedeutenden Meilenstein sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Anwendung im Bereich des Building Information Modeling dar. Es hat einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung fortschrittlicher Technologien und Methoden im Bereich der digitalen Erfassung und Modellierung von Gebäuden geleistet, wobei der Schwerpunkt auf der effizienten Nutzung und Modernisierung bestehender Strukturen lag. Besonders hervorzuheben ist die herausragende Zusammenarbeit zwischen dem Institut für intelligente Gebäude und den Industriepartnern. Diese Kooperation war geprägt von einer produktiven Arbeitsatmosphäre, gegenseitigem Respekt und einem kontinuierlichen, offenen Informationsaustausch. Die gute Kommunikation hat ermöglicht, dass alle Beteiligten effektiv und zielgerichtet zusammenarbeiten konnten.

Die positive Erfahrung und der Erfolg des Projekts haben eine solide Grundlage für zukünftige Kooperationen geschaffen. Die Partner sind motiviert, ihre Zusammenarbeit fortzusetzen und auf die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aufzubauen. Es besteht ein starkes Interesse, diese erfolgreiche Partnerschaft in weiteren Forschungsprojekten fortzuführen und möglicherweise in Ausgründungen zu überführen. Dies unterstreicht das Potenzial für eine langfristige und fruchtbare Zusammenarbeit, die nicht nur die Grenzen der Forschung erweitert, sondern auch konkrete, innovative Lösungen für die Industrie hervorbringt. Insgesamt kann das BIMiB-Projekt als ein erfolgreiche Verbindung von akademischer Forschung und industrieller Anwendung angesehen werden, welche positiv zur Weiterentwicklung des Bauwesens beiträgt.

Der Abschlussbericht illustriert, wie die Kombination aus interdisziplinärer Forschung und enger Industriekooperation zu einem erfolgreichen Modell für die Integration fortschrittlicher technologischer Ansätze im Bauwesen wurde, wodurch zukunftsorientierte, nachhaltige und wirtschaftlich effiziente Lösungen ermöglicht werden.



---



**BIM**  **iB**

**Building  
Information  
Modeling im Bestand**

---

Silke Dierssen

Mario Cichonczyk

Uwe Weitkemper

Dominic Becking



Hochschule  
Bielefeld  
University of  
Applied Sciences  
and Arts



Institute for the  
Intelligent Building



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Abschlussbericht

Projekt: **“Building Information Modeling im Bestand - Nachhaltige Lebenszyklusverlängerung von Bestandsbauwerken durch automatisierte Aufnahme und Analyse der Tragsysteme”**

Akronym: BIMiB Tragsystem  
Förderlinie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“  
im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“  
gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 13FH554IX6  
Projektlaufzeit: 01.05.2019 - 31.10.2023  
Projekträger: VDI Technologiezentrum GmbH  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf

Hochschule: Hochschule Bielefeld  
Campus Minden  
Artilleriestraße 9  
32427 Minden

Projektleiter: Prof. Dr. Dominic Becking

## **Danksagung**

Die Projektkoordination, die Mitarbeitenden und die Autoren dieses Berichts, sowie die Hochschule Bielefeld - University of Applied Sciences and Arts (HSBI) möchten ihre tiefe Dankbarkeit gegenüber dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zum Ausdruck bringen. Dieser Dank gilt insbesondere für das in unser Projekt gesetzte Vertrauen sowie für die großzügige Unterstützung, die wesentlich zum Erfolg des Vorhabens beigetragen hat. Unser Dank gilt ebenfalls den Projektpartnern HOCHTIEF ViCon GmbH und Pape Architekten für ihre engagierte und konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen dieses Projektes. Wir schätzen die gemeinsamen Anstrengungen und den wertvollen Beitrag, den diese Kooperationen zur erfolgreichen Realisierung des Forschungsprojektes geleistet haben. Ihr Engagement und ihre Expertise waren entscheidend für die Erreichung unserer Projektziele und haben wesentlich zum Gelingen unseres Vorhabens beigetragen. Darüber hinaus möchten wir uns beim Labor für Bauvermessung des Campus Minden für die Unterstützung bei der Erstellung von experimentellen Datensätzen bedanken. Im gleichen Kontext waren das Ingenieurbüro Schöne in Minden sowie die L.I.T. AG in Päpinghausen von maßgeblicher Bedeutung, sodass wir auch diesen Unterstützern gerne unsere Verbundenheit zum Ausdruck bringen möchten.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Überblick.....</b>	<b>1</b>
1.1. Problembeschreibung.....	1
1.2. Zeitrahmen.....	2
1.3. Projektablauf.....	2
1.4. Stand von Forschung und Technik.....	6
1.5. Partner.....	7
<b>2. Detailbeschreibung.....</b>	<b>9</b>
2.1. Beschreibung Forschungsstränge.....	9
2.2. Ergebnisse.....	13
2.3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	19
2.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	20
2.5. Verwertbarkeit des Projektergebnisses.....	21
2.6. Während des Projekts bekannt gewordene Fortschritte Dritter.....	22
2.7. Gesamtbewertung.....	22
2.8. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	23
Referenzen.....	24

# 1. Überblick

## 1.1. Problembeschreibung

Das Projekt "Building Information Modeling im Bestand - Nachhaltige Lebenszyklusverlängerung von Bestandsbauwerken durch automatisierte Aufnahme und Analyse der Tragsysteme" (BIMiB Tragsystem) zielte darauf ab, neue Ansätze zu entwickeln, welche aus 3D-Punktwolken und digitalisierten Papierplänen mittels künstlicher Intelligenz Tragwerksstrukturen von Bestandsbauten automatisiert erkennen und in einem semantischen Metamodell plausibilisieren können. Die erfassten Daten sollten in Standardprogramme des Building Information Modeling (BIM) integriert werden, um Planungen von Umnutzungen und Revitalisierungen zu erleichtern, was Kosten reduziert und die Wirtschaftlichkeit sowie Ausführungssicherheit erhöht.

Das ursprüngliche Ziel und die Hauptaufgabe des Projekts bestanden darin, vorhandene Informationen, insbesondere Bestandspläne in Papierform, zu nutzen und zu digitalisieren, um Tragwerksstrukturen und deren Eigenschaften effizient zu erkennen. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Ziels war die Erzeugung und Anwendung von Punktwolken aus Laserscans, um eine präzisere Erfassung dieser Strukturen zu ermöglichen. Das Projekt zielte darauf ab, die Erkennungsrate durch die Kombination beider Methoden signifikant zu verbessern. Ein weiteres Hauptziel war die Entwicklung semantischer Kontexte als Ontologien, um die erkannten Strukturen mit baufachlichen und bauhistorischen Informationen zu verknüpfen. Die Verbesserung der Erkennung, besonders von verdeckten Elementen, und deren Plausibilisierung standen ebenfalls im Fokus. Zudem strebte das Projekt an, alle erfassten Informationen und identifizierten Strukturen mit einer tiefgreifenden Semantik anzureichern. Abschließend war es ein zentrales Anliegen, diese semantischen Informationen mit einem neu zu entwickelnden Building Information Metamodell zu verknüpfen, um eine ganzheitliche und integrierte Datenanalyse und -nutzung zu ermöglichen.

Die Bedeutung und Motivation des Projektes liegt in der steigenden Relevanz des Bauens im Bestand, speziell in Bezug auf das Bauvolumen, die Vielfalt und die Komplexität der Aufgabenstellungen. In der Baubranche nimmt der Anteil der Bauaufgaben im Bestand stetig zu, mit einer deutschlandweiten Experteneinschätzung von 60 % der Gesamtbautätigkeit und einer steigenden Tendenz. Ein Kernproblem dabei ist, dass Kenntnisse über bestehende Bauwerke oft unvollständig sind. Der Beitrag des Projekts zielt darauf ab, den Planungsprozess von Umnutzungen und Revitalisierungen von Gebäuden effizienter zu

gestalten. Dadurch sollen Kosten reduziert, die Wirtschaftlichkeit und Ausführungssicherheit erhöht und der Lebenszyklus von Bestandsbauten verlängert werden. Das Projekt trägt somit zu einem ressourcenschonenden Umgang mit dem Gebäudebestand bei und unterstützt die Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung, den Gebäudebestand in Deutschland bis 2050 nahezu klimaneutral zu gestalten.

## 1.2. Zeitrahmen

Die Koordination des Forschungsprojekts oblag Prof. Dr. Dominic Becking, der in seiner Rolle als Projektleiter fungierte. Dabei wurde er maßgeblich durch den internen Verbundpartner Prof. Dr.-Ing. Uwe Weitkemper unterstützt. Das Projekt wurde dem Institut für intelligente Gebäude an der Hochschule Bielefeld, Campus Minden, zugeordnet.

Ursprünglich war das Projekt für eine Dauer von 48 Monaten, beginnend am 01. Mai 2019 und endend am 30. April 2023, geplant. Jedoch führten die unerwarteten Herausforderungen, die durch die Corona-Pandemie entstanden, zu notwendigen Anpassungen im Projektablauf. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate resultierte in einem revidierten Enddatum am 31. Oktober 2023.

Während der Projektlaufzeit waren zwei Industriepartner maßgeblich involviert: HOCHTIEF ViCon GmbH und Pape Architekten. Zudem erhielt das Projekt Unterstützung durch nicht-investierende Kooperationspartner. Zu diesen zählten das Labor für Bauvermessung des Campus Minden, das Ingenieurbüro Schöne in Minden sowie die L.I.T. AG in Päpinghausen. Diese Zusammenarbeit trug wesentlich zur Konzeption und Realisierung des Forschungsvorhabens bei.

## 1.3. Projektablauf

Das Projekt gliederte sich in vier zentrale Forschungsstränge, die jeweils spezifische Aspekte des Themas adressierten.

- 1. Interpretation von Punktwolken und Erkennung von Baustrukturen mit Methoden des maschinellen Lernens:** Dieser Strang konzentrierte sich auf die Identifizierung und Klassifizierung von Strukturen in 3D-Punktwolken. Die Fokussierung auf die Interpretation von Punktwolken und die Erkennung von Baustrukturen spiegelt die fortschreitende Bedeutung digitaler Technologien in der Architektur und im Bauingenieurwesen wider. Durch die Anwendung von Machine Learning auf Punktwolken können präzise 3D-Modelle von Baustrukturen erstellt

werden, was für die Planung, den Erhalt und die Restaurierung von Gebäuden von entscheidender Bedeutung ist.

AP 1-1	Auswahl vielversprechender Algorithmen
AP 1-2	Bestimmung erster Kategorienkandidaten aus den entstehenden baulichen Kontexten.
AP 1-3	Aufbau eines Trainingsdatenset.
AP 1-4	Weiterentwicklung und Anpassung, sowie Tuning der ausgewählten Algorithmen.
AP 1-5	Abgleich und Verknüpfung erkannter Kategorien mit dem Metamodell.

2. **Digitalisierung und Interpretation von Bestandsplänen in Papierform mit Methoden des maschinellen Lernens:** Ziel von FS2 war es, Papierpläne zu digitalisieren und relevante Informationen aus ihnen automatisch zu extrahieren. Die Digitalisierung und Interpretation von Bestandsplänen in Papierform ist ein wesentlicher Schritt zur Integration historischer und bestehender Baupläne in moderne digitale Systeme. Dieser Forschungsstrang trägt dazu bei, eine Brücke zwischen traditionellen Architekturmethoden und aktuellen digitalen Ansätzen zu schlagen. Weiterhin ist die Integration zweidimensionaler und dreidimensionaler Informationsbestände von besonderem Wert für die Bestandsdigitalisierung.

AP 2-1	Auswahl vielversprechender Algorithmen zur Kategorisierung von Baustrukturen in Papierplänen unter Berücksichtigung der bestehenden Literatur sowie der Ergebnisse aus Forschungsstrang 1
AP 2-2	Validierung, Überarbeitung und Anpassung der in FS1 entwickelten Kategorienkandidaten an den Kontext der Papierpläne unter Abgleich der ggf. weiterentwickelten baulichen Kontexte aus dem FS3.
AP 2-3	Aufbau eines Trainingsdatensets unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus FS1.
AP 2-4	Weiterentwicklung und Anpassung, sowie Tuning der ausgewählten Algorithmen nach der Standard-Vorgehensweise.

AP 2-5	Abgleich und Verknüpfung erkannter Kategorien mit dem Metamodell.
--------	---

- 3. Definition und Erarbeitung von baufachlichen, bauhistorischen und konstruktiven Kontexten und Entwicklung eines Metamodells:** Dieser Teil des Projekts befasste sich mit der Erstellung eines Metamodells, das verschiedene bauhistorische und technische Kontexte integriert. Die Definition bauhistorischer, konstruktiver und normativer Kontexte und die Entwicklung eines Metamodells sind für das Verständnis und die Bewertung von Bauwerken essentiell. Dieser Strang ermöglicht ein tieferes Verständnis der historischen, technischen und rechtlichen Aspekte, die für die Erhaltung und Entwicklung von Bauwerken wichtig sind. Diese abgeleiteten Informationsobjekte können wiederum im Scan2BIM-Prozess als maschinenverständliche Wissensrepräsentationen abgebildet werden.

AP 3-1	Auswahl der wichtigsten und der vorrangig zu betrachtenden Modellelemente gemäß des IFC-Standard und Definition ihrer Eigenschaften auf der Ebene von Tragwerk und statischem System, Querschnitt und Profil, Material und Bauart.
AP 3-2	Zusammenstellung der generell existierenden und häufig verwendeten Möglichkeiten der Herstellung von den unter AP 3-1 ausgewählten Bauteilen / Modellelementen für eine Tragkonstruktion im Hinblick auf die Aspekte aus AP 3-1. Die Zusammenstellung der häufig ausgeführten Konstruktionen erfolgt in Abhängigkeit von / in Bezug zu Bauwerkstyp und -nutzung.
AP 3-3	Strukturierung der Herstellungsmöglichkeiten aus AP 3-2 sowie Erkennung und Aufbereitung der Zusammenhänge untereinander im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen tragenden Bauteilen und nicht tragenden Bauteilen.
AP 3-4	Strukturierung der Herstellungsmöglichkeiten aus AP 3-2. sowie Erkennung und Aufbereitung der Zusammenhänge untereinander im Hinblick auf die bauhistorischen Zusammenhänge.
AP 3-5	Aufbereitung der Einzelinformationen (Begriffe) und Zusammenhänge (Regeln) aus AP 3-1 (Eigenschaften von Bauteilen), AP 3-2 (generelle

	Möglichkeiten der Herstellung), AP 3-3 (Beurteilung im Hinblick auf die Tragfunktion) und AP 3-4 (Einordnung in die Bauhistorie) in digitalisierter und formaler Form zur anschließenden Verwendung in Algorithmen, Diensten und Anwendungsprogrammen durch Aufbau entsprechender Ontologien.
--	---

4. **Semantische Kontextualisierung und interdisziplinäre Plausibilisierung mit Methoden des maschinellen Lernens:** In diesem Forschungsstrang geht es um die Verknüpfung und Überprüfung der aus den anderen Strängen gewonnenen Informationen, um eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten zu gewährleisten. Die semantische Kontextualisierung und interdisziplinäre Plausibilisierung sind entscheidend für die Validierung und Verifizierung von Bestandsdaten und Modellen. Durch die Verwendung von multi-modalen Methoden in diesem Bereich wird sichergestellt, dass die Daten und Modelle nicht nur technisch korrekt, sondern auch kontextuell angemessen und interdisziplinär stimmig sind.

AP 4-1	Ermittlung der durch die Kombination der Wahrscheinlichkeiten aus beiden Verfahren sicher erkennbaren Kategorien. Ermittlung eines Satzes fehlender bzw. mit geringer Wahrscheinlichkeit erkannter Kategorien aus Differenzbildung mit dem Metamodell
AP 4-2	Kombination und Erweiterung der Datentestsets aus der Erkennung von singulären Datenquellen zu einem Testset für multiple Datenquellen.
AP 4-3	Transformation und Anwendung der bislang erarbeiteten Kategorien und Metaklassen auf die erweiterte Aufgabenstellung
AP 4-4	Auswahl und Test vielversprechender Algorithmen-Kandidaten <ul style="list-style-type: none"> <li>a) aus den Bereichen Multi-View Ensemble und Multi-View Transfer Learning</li> <li>b) aus speziellen Bereichen, wie Kategorienerkennung unter Berücksichtigung des Szenenkontexts.</li> </ul>
AP 4-5	Weiterentwicklung und Anpassung, sowie Tuning der ausgewählten Algorithmen nach der Standard-Vorgehensweise

AP 4-6	Abgleich und Verknüpfung erkannter Kategorien mit dem Metamodell.
AP 4-7	Generierung von Plausibilitätsregeln auf der Basis der bisher sicher erkannten Kategorien und ihrer Verknüpfungen mit dem Metamodell.
AP 4-8	Zusammenführung der Verfahren mit Plausibilitätstests.
AP 4-9	Evaluation des Gesamtverfahrens.

#### 1.4. Stand von Forschung und Technik

Die zunehmende Bedeutung von Building Information Modeling (BIM) erstreckt sich nicht nur auf die Konstruktion neuer Gebäude, sondern gewinnt auch bei der Arbeit an Bestandsgebäuden an Bedeutung. Die Forschung von Barbosa et al. [17] unterstreicht die wachsende Nutzung von BIM bei Eingriffen in bestehende Gebäude und betont die Vorteile, die BIM für die Verbesserung der Zusammenarbeit und Effizienz in solchen Projekten bietet. Ein wesentlicher Fortschritt in diesem Bereich ist die kontinuierliche Entwicklung und Verfeinerung des Scan2BIM-Prozesses. Dieser Prozess umfasst die Überführung dreidimensionaler physischer Gebäudedaten, die durch Laserscanning gewonnen werden, und Informationen aus existierenden Gebäudeplänen in präzise 3D-BIM-Modelle. Derzeit erfordert dies größtenteils manuelle Bearbeitung, was es zu einem zeitaufwendigen und nicht wirtschaftlichen Vorhaben macht. Diese Entwicklung signalisiert ein starkes Bestreben nach Automatisierung, mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit sowie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von BIM-Modellen für bestehende Gebäude zu verbessern. Ein systematischer Ansatz ist hierbei unerlässlich [16].

Trotz der Fortschritte bleiben Herausforderungen bestehen, insbesondere im Umgang mit unvollständigen Dokumentationen und unsicheren Informationen über bestehende Gebäudestrukturen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden verschiedene innovative Ansätze verfolgt. Ponciano et al. [11] haben beispielsweise einen Objekterkennungsprozess entworfen, der explizites Wissen nutzt, um eine kontextabhängige Lösung für die Objekterkennung zu entwickeln. Dieser Ansatz zeigt das Potenzial von Wissen und Kontextbewusstsein bei der Verbesserung der Genauigkeit von BIM-Modellen. Werbrouck et al. [18] haben das Konzept des "Scan-to-Graph" entwickelt, eine Erweiterung des traditionellen Scan2BIM-Prozesses. Dieser Ansatz bereichert geometrische Daten semantisch und speichert sie als RDF-Graph (Resource Description Framework). Diese Integration von BIM mit semantischen Web-Technologien bietet innovative Lösungen für

spezifische Herausforderungen, die sich bei der Arbeit mit bestehenden Gebäuden ergeben, wie beispielsweise Unsicherheiten, geometrische Unregelmäßigkeiten und die Klassifikation von Bauteilen.

Pizarro et al [1] stellten fest, dass Algorithmen, die auf maschinellem Lernen basieren, viele Fortschritte in der Planerkennung erzielt haben, diese aber bei Rekonstruktionen an ihre Grenzen stoßen, die dem Anspruch der Informationskomplexität von realistischen Ingenieursproblemem entsprechen. Die Kombination aus regelbasierten Modellen und lernbasierten Ansätzen wird als effektive Lösung vorgeschlagen. Regelbasierte Modelle sind besonders gut darin, Aufgaben zu bewältigen, die sehr spezifische, detaillierte Lösungen erfordern, welche für ML-Modelle schwer zu erfassen sind. Die beiden Ansätze – regelbasiert und lernbasiert – können kombiniert werden. Diese Kombination ermöglicht es, ein breiteres Spektrum an Scan2BIM Problemen effektiver zu lösen. Eine integrative Nutzung von regelbasierten und lernbasierten Modellen in der Planerkennung kann dazu beitragen, sowohl komplexe, detailreiche Aufgaben als auch allgemeinere Probleme effizienter und genauer zu lösen. Aktuelle Arbeiten zeigen, dass diese Erkenntnis aufgegriffen wird und in verschiedenen Problemberichen relevante Verbesserungen generiert [2][3][4][5][6][7][8][9]. Eine ähnliche Beobachtung lässt sich für den dreidimensionalen Anwendungsfall der Rekonstruktion von Lidar-Scans machen. Das Review von Abre et al [10] zeigt dazu einen umfassenden Überblick. Arbeiten, die über reines Machine Learning hinausgehendes Kontextwissen integrieren, sind ein erfolgreicher nächster Schritt für den Scan2BIM-Prozess [11][12][13][14][15].

## 1.5. Partner

### **HOCHTIEF ViCon**

Die Firma HOCHTIEF ViCon hat sich als einer der führenden Anbieter von Lösungen im BIM-Umfeld an der Entwicklung des Systems durch finanzielle, personelle und Sachmittel beteiligt. Neben der finanziellen und personellen Beteiligung stellte HOCHTIEF ViCon dem Projekt umfangreiche Daten für die Erstellung von Trainingssets für Machine-Learning-Algorithmen zur Verfügung. Darüber hinaus assistierte die HOCHTIEF ViCon beim Erstellen von neuen Laserscans und ermöglichte den Zugang zu entsprechenden Geräten sowie Objekten. Die Aufgaben der HOCHTIEF ViCon in diesem Projekt waren:

- Herstellen des ständigen Praxisbezugs, insbesondere für Großprojekte,
- Fachliche Beratung, insbesondere für das Anwendungsfeld Großprojekte,

- Beteiligung an Arbeitspaketen,
- Beiträge zur Internationalisierung des Projekts an den verschiedenen Standorten und Projekten der HOCHTIEF ViCon,
- Mitwirkung bei der Qualifizierung der Promovenden.

### **Pape Architekten**

Pape Architekten, ein mittelständisches Architektur- und Ingenieurbüro, arbeitete als überregionaler Dienstleister für komplexe Bauvorhaben im Segment der Gewerbe-, Industrie- und Verwaltungsgebäude. Die Firma Pape beteiligte sich an der Entwicklung des Systems durch finanzielle, personelle und Sachmittel.

Die Aufgaben der Firma Pape Architekten in diesem Projekt waren:

- Herstellen des ständigen Praxisbezugs, insbesondere im Bereich der Gebäudeplanung und des Baumanagements,
- Fachliche Beratung, insbesondere aus der Sicht der Planer und Baumanager,
- Ermöglichen des Zugangs zu aktuellen Bauprojekten,
- Konkrete Beteiligung an Arbeitspaketen,
- Mitwirkung bei der Qualifizierung der Promovenden.

Die Organisation der Zusammenarbeit zwischen dem Institut und den Industriepartnern im Rahmen des BIMiB-Projekts zeichnete sich durch eine strukturierte und effektive Kommunikationsstrategie aus. Regelmäßige Jour Fix Termine bildeten das Rückgrat dieser Kooperation, indem sie eine kontinuierliche Abstimmung und einen konstanten Informationsfluss zwischen allen Beteiligten gewährleisteten. Diese regelmäßigen Treffen wurden durch Einladungen zu Hausmessen bei den Partnern ergänzt, welche Gelegenheiten boten, neueste Forschungsergebnisse und technologische Entwicklungen zu präsentieren und zu diskutieren. Meetings direkt bei den Industriepartnern ermöglichten einen tieferen Einblick in die praktischen Anwendungen und Herausforderungen in der Industrie, während Telepräsenzkonferenzen eine flexible und effiziente Kommunikation über räumliche Distanzen hinweg sicherstellten. Die gesamte Zusammenarbeit war von einer sehr produktiven Arbeitsatmosphäre geprägt, die es ermöglichte, Ideen offen auszutauschen und gemeinsam innovative Lösungsansätze zu entwickeln. Diese strukturierte, aber dennoch flexible Organisation der Zusammenarbeit trug maßgeblich zum Erfolg des Projekts bei und wurde von den Beteiligten als effektive Partnerschaft zwischen akademischen und industriellen Sektoren wahrgenommen.

## 2. Detailbeschreibung

### 2.1. Beschreibung Forschungsstränge

#### **Forschungsstrang 1: Interpretation von Punktwolken und Erkennung von Bauteilelementen mit Methoden des maschinellen Lernens**

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde eine umfassende Recherche aktueller Technologien und Ansätze im Bereich des Volumetric Deep Learnings durchgeführt, wobei ein besonderes Augenmerk auf PointNet++ und dessen Derivate gelegt wurde. Diese Technologie, die für die Verarbeitung von 3D-Punktwolkendaten entwickelt wurde, stellte den State-of-the-Art im Bereich des volumetrischen Lernens dar. Die Analyse von PointNet++ und verwandten Methoden ermöglichte es, aktuelle Techniken zur Verarbeitung und Interpretation von Punktinformationen auf Laserscandaten zu übertragen (**AP 1-1**). In diesem Kontext wurden Untersuchungen zur algorithmischen Komplexität der aktuellen Verfahren durchgeführt, insbesondere im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf hochauflöste architektonische Laserscans. Diese Analysen waren darauf ausgerichtet, ein tiefgreifendes Verständnis für die Effizienz und Leistungsfähigkeit verschiedener Algorithmen im Kontext von großen und detaillierten Laserscandaten zu entwickeln. Dies beinhaltete die Bewertung von Verarbeitungszeiten, Genauigkeit und Ressourcenbedarf der Algorithmen, um eine optimale Anwendung in der Praxis sicherzustellen. Die Ergebnisse dieser Analysen trugen wesentlich dazu bei, die Auswahl der für das Projekt am besten geeigneten Technologien und Methoden zu informieren und zu leiten.

Im Zuge unserer Untersuchungen stellte sich heraus, dass der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf 3D-Klassifizierungsprobleme primär auf vorsegmentierte Szenarien mit geringer Punktdichte ausgerichtet ist. Diese Ausrichtung erwies sich als nicht direkt praktikabel für die Anwendung auf Scans, die mit typischen Lidar-Geräten der Industriepartner erstellt wurden. Als Reaktion darauf wurden zunächst einfachere Kategoriekandidaten für Testzwecke ausgewählt, darunter Elemente wie Wände, Decken, Fenster und Türen (**AP 1-2**). Diese Auswahl ermöglichte es, erste praxisnahe Tests durchzuführen und die Eignung der existierenden Technologien für unser spezifisches Anwendungsszenario zu bewerten. Es wurde jedoch schnell deutlich, dass dreidimensionale Deep-Learning-Verfahren in ihrer aktuellen algorithmischen Komplexität noch zu unausgereift waren, um für unseren spezifischen Anwendungsfall direkt Nutzen bringen zu können. Diese Erkenntnis führte zu einer Erweiterung unseres Forschungsansatzes: Neben den fortschrittlichen Deep-Learning-Methoden wurden auch alternative Verfahren in die Recherche einbezogen. Dies erweiterte den Rahmen unserer Untersuchungen, sodass auch heuristisch gestützte

Ansätze Berücksichtigung fanden (**AP 1-4**). Diese Anpassung des Forschungsansatzes ermöglichte es, ein breiteres Spektrum an Lösungen zu erkunden und dabei Methoden zu identifizieren, die besser auf die spezifischen Herausforderungen und Anforderungen unseres Anwendungsfalls abgestimmt waren. Aus allen Erkenntnissen bis zu diesem Punkt haben wir einen Requirementskatalog erstellt, welcher die Auswahl und Erstellung eines Testdatensatzes unterstützt hat. Mit dieser Aufstellung konnten wir in Kooperation mit unseren Industriepartnern in deren erweiterten Netzwerk die Suche nach geeigneten, realen Testgebäuden beginnen (**AP 1-3**).

## **Forschungsstrang 2: Digitalisierung und Interpretation von Bestandsplänen in Papierform mit Methoden des maschinellen Lernens**

Im Forschungsstrang 2 wurden erste Tests auf pixelbasierten 2D-Bestandsplänen durchgeführt. Durch Interviews mit Domänenexperten konnten relevante Kandidatenkategorien und Informationsobjekte identifiziert werden, wobei ein besonderer Fokus auf Bemaßungsdaten gelegt wurde (**AP 2-2**). Für die Extraktion von numerischen Textfeldern an Maßketten wurden verschiedene Ansätze erprobt. Der EAST Textdetektor, als State-of-the-Art-Technologie, wurde zur Segmentierung der Plandaten herangezogen. Anschließend wurden unterschiedliche Textrekonstruktionsverfahren getestet, wobei sich insbesondere Tesseract und easyOCR in unseren Versuchen als effektiv erwiesen (**AP 2-1**). Durch den Einsatz morphologischer Operationen gelang es, Tragwerkselemente aus den informationsgesättigten Plänen herauszuarbeiten und so Erfolge bei der Überführung von eingescannten Gebäudegrundrissen in strukturierte Metamodelle zu erzielen (**AP 2-5**). Parallel dazu wurden die kognitiven Prozesse des Struktursehens aufgearbeitet und die Wirkmechanismen des visuellen Systems im Kontext der Manhattan-Welt-Annahme untersucht. Bestehende Modellarchitekturen wie ACT-R, das Modell nach Rensink und Gestaltprinzipien wurden als potenziell relevant bewertet und in die Forschungsarbeit integriert (**AP 2-4**). Dank der Unterstützung durch die Projektpartner konnte ein geeignetes Testgebäude in Päpinghausen (Minden), das dem definierten Anforderungskatalog entsprach, gefunden werden. Über mehrere Wochen hinweg wurde dieses Gebäude mit Unterstützung des Labors für Bauvermessung des Campus Minden gescannt. Eine hochaufgelöste Lidar-Punktwolke wurde erstellt und zusammen mit den entsprechenden Bestandsplänen an das Architekturbüro Pape zur Modellierung übergeben. Ein Building Information Model wurde nach Industriestandard von den Partnern erstellt, wobei HOCHTIEF ViCon diesen Prozess inhaltlich begleitete (**AP 2-3**). Die Pandemiesituation verhinderte Vor-Ort-Versuche, Hospitationen und Expertenbefragungen. Daher wurde der Fokus vorerst auf die Entwicklung eines Systems zur Untersuchung des

Modellierungsprozesses gelegt. Es wurden Anforderungen für einen experimentellen Versuchsaufbau erarbeitet und die Entwicklung eines speziell für BIM-Modellierungen ausgelegten Eyetrackingsystems durchgeführt. Dies ermöglicht empirische Untersuchungen zum Einfluss visueller Aufmerksamkeit auf die Interpretation von 2D- und 3D-Gebäudedaten.

### **Forschungsstrang 3: Definition und Erarbeitung von baufachlichen, bauhistorischen und konstruktiven Kontexten und Entwicklung eines Metamodells**

Ein Metamodell im Kontext des Bauwesens ist eine strukturierte Darstellung, die dazu dient, verschiedene Modelle, Daten und Konzepte in der Bauindustrie zu integrieren und zu organisieren. Es stellt eine übergeordnete Ebene der Abstraktion dar, die es ermöglicht, die Beziehungen und Prinzipien zwischen verschiedenen baulichen Elementen und Prozessen zu verstehen und zu konzeptualisieren. Die Implementierung eines solchen Metamodells erforderte zunächst die Identifikation und Definition der relevanten Elemente und Konzepte im Bauwesen. Dafür wurde der Einsatz eines Eyetracking-Systems, das eine datengestützte und präzise Analyse der Interaktionen von Modelliererinnen mit Gebäudedaten ermöglicht, entwickelt. Das System erleichtert nicht nur diese Identifikation, sondern bietet auch grundlegende Einblicke in die Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung während des Modellierungsprozesses. Denn bei der Entwicklung eines Metamodells lag der Fokus ebenso auf das Verständnis und die Integration verschiedener Wissensarten: konzeptuelles Wissen (Grundlagen und Theorien), prozedurales Wissen (Anwendungsverfahren), explizites Wissen (klar artikulierte Fakten) und implizites Wissen (Erfahrungswissen, das schwer zu artikulieren ist).

Recherchen ergaben, dass es bereits bestehende Ontologien für die Bauindustrie gibt, darunter auch BOT (Building Topology Ontology). BOT ist eine einfache Ontologie, die grundlegende Strukturen eines Gebäudes beschreibt. Auf dieser Basis wurde weiter aufgebaut, indem fehlende Klassen und Attribute ergänzt wurden, um ein umfassenderes Verständnis der baulichen Elemente zu ermöglichen. Eine Anwendung für die Erkennung von Geschossdecken wurde mit diesem erweiterten Metamodell durchgeführt. Die Erweiterung ermöglichte es, eine tiefere Analyse der Bauweise durchzuführen, wobei technische Aspekte, wie sie in den Arbeitsschritten **AP 3-1** bis **AP 3-5** beschrieben sind, berücksichtigt wurden.

## **Forschungsstrang 4: Semantische Kontextualisierung und interdisziplinäre Plausibilisierung mit Methoden des maschinellen Lernens**

Im Forschungsstrang 4 wurde ein wesentlicher Fortschritt durch die Integration von 2D- und 3D-Daten in ein gemeinsames Modell erzielt (**AP 4-3**). Dies wurde durch die automatisierte Transformation der Testdaten ermöglicht. Ein zentraler Aspekt dieses Prozesses war die Entwicklung und Anwendung neuer heuristischer Ansätze, die darauf abzielten, die Geschwindigkeit und Effizienz etablierter Registrierungsverfahren zu steigern. Diese Optimierungen basierten maßgeblich auf dem Einbezug der rekonstruierten Informationsobjekte aus der zuvor entwickelten OCR-Pipeline. Ein weiterer bedeutender Schritt war der Einbezug semantischer Wissensmodelle (**AP 4-4**). Durch diese Modelle konnte eine Reduktion von Unsicherheiten in der Pipeline erreicht werden. Die semantischen Modelle trugen dazu bei, die Daten in einen sinnvollen Kontext zu setzen, was eine genauere Interpretation und Anwendung der Informationen ermöglichte (**AP 4-6**). Mit diesem Ergebnis wurden Versuche zur semantischen Filterung von Bestandsdaten unternommen, indem unser Ansatz der multi-modalen Datenintegration genutzt wurde. Diese Methode ermöglichte es, relevante Informationen aus mehreren heterogenen Datenquellen effektiv zu extrahieren und zu integrieren. Die multi-modale Datenintegration spielte eine Schlüsselrolle bei der effizienten Nutzung und Verarbeitung der umfangreichen und komplexen Datensätze. Diese innovative Herangehensweise führte zu einer verbesserten Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit bei der Handhabung und Analyse von Bestandsdaten, was letztendlich zum Gesamtergebnis des Projekts beitrug (**AP 4-5**). Weiterhin wurde unser Testdatensatz erweitert und überarbeitet, um zusätzliche Erkenntnisse und Anforderungen aus den vorangegangenen Forschungssträngen zu integrieren (**AP 4-2**). Diese Anpassung des Datensatzes ermöglichte es uns, ein tieferes Verständnis der verschiedenen Aspekte und Herausforderungen des Anwendungsfalls zu erlangen. Wir haben weitere Testszenarien mit externen, akademischen Datensätzen entwickelt, um die Generalisierungsfähigkeit und Anwendbarkeit unserer Konzepte zu überprüfen. Ein relevanter Datensatz in diesem Kontext war der Cubicasa5k-Datensatz [21]. Die Nutzung dieses spezifischen Datensatzes gab uns wertvolle Einblicke in die Leistung unserer Methoden unter verschiedenen Bedingungen und trug dazu bei, die Robustheit und Flexibilität unserer Ansätze zu testen. Diese Tests waren aufschlussreich, um die Übertragbarkeit und Effektivität unserer Forschungsergebnisse auf eine breitere Palette von Szenarien und Anwendungsfällen zu eruieren. Zuletzt wurden Evaluationsversuche mit dem aktualisierten und von den Projektpartnern zusammengestellten Experimentaldatensatz durchgeführt. Diese Evaluierung war ein entscheidender Schritt, um die Praxistauglichkeit unseres Ansatzes zu überprüfen. Dabei erfolgte die Integration der 2D- und

3D-Datenquellen des realen Testgebäudes. Unser Lidar-Scan, der nach Industriestandard durchgeführt wurde, zusammen mit den typischen pixelbasierten Plandaten, bildete die Grundlage für diese Tests. Das von uns entwickelte Verfahren wurde angewendet, um diese verschiedenen Datenquellen zu verarbeiten und in ein kohärentes Gesamtmodell zu überführen. Die Ergebnisse dieser Verarbeitung wurden anschließend am Referenz-BIM-Modell geprüft. Diese Überprüfung ermöglichte es uns, die Genauigkeit und Effektivität unseres Verfahrens zu bewerten und gab wertvolle Einblicke in die Leistungsfähigkeit unserer Methodik unter realen Bedingungen (**AP 4-8**). Zusätzlich zu den bereits erwähnten Evaluationsversuchen konnten wir unser Analyseverfahren um spezielle Modellbewertungsverfahren erweitern, die auf ontologischen Metriken basieren. Diese Metriken ermöglichen eine tiefere und strukturierte Bewertung der erstellten Modelle. Durch den Einsatz ontologischer Ansätze konnten wir die Beziehungen und Abhängigkeiten innerhalb der Datenstrukturen präziser erfassen und analysieren. Diese Vorgehensweise erlaubte es uns, die Qualität und Kohärenz der integrierten Modelle aus einer ganzheitlichen Perspektive zu bewerten. Die ontologischen Metriken lieferten somit wertvolle Einsichten in die strukturelle Integrität und semantische Genauigkeit der Modelle, was für die Validierung und Verfeinerung von rekonstruktionsverfahren von entscheidender Bedeutung ist (**AP 4-9**).

## 2.2. Ergebnisse

### **Beobachtungen zu ML in Scan2BIM**

In der aktuellen Forschung zu Scan2BIM-Techniken wurden wichtige Erkenntnisse im Bereich des maschinellen Lernens gewonnen. Es zeigte sich, dass die Bewertung dieser Methoden hinsichtlich ihrer Fähigkeit, verschiedene Detaillierungstiefen und Informationsumfänge automatisch zu erfassen, oft unzureichend ist. Mit zunehmender Detaillierungstiefe und Informationsdichte steigt die Komplexität der vom ML-Modell zu erlernenden Daten, was sowohl eine Herausforderung für die Erkennungsverfahren darstellt als auch die Nützlichkeit der automatisch erstellten BIM-Modelle im BIM-Prozess beeinflusst. Zudem wurde erkannt, dass der Informationsgehalt von BIM-Elementen bei zunehmender Komplexität stärker im Kontext des Gesamtgebäudemodells betrachtet werden muss. Daher ist die Entwicklung eines spezialisierten Referenzdatensatzes, der semantische Tiefe berücksichtigt, entscheidend für eine realistische Bewertung der Praxistauglichkeit von Scan2BIM-Verfahren. Es konnte festgestellt werden, dass die kognitive Lücke zwischen Datenbasis und Referenzmodell im Scan2BIM-Anwendungsfall zu groß für aktuelle Deep Learning Ansätze ist. Auch wenn die Verfahren kontinuierlich von der Forschungsgemeinde weiterentwickelt werden, ist noch keines als "off-the-shelf" Lösung unmittelbar in die Praxis überführbar. Wir führen dieses Problem auch auf die mangelnde Verfügbarkeit großer

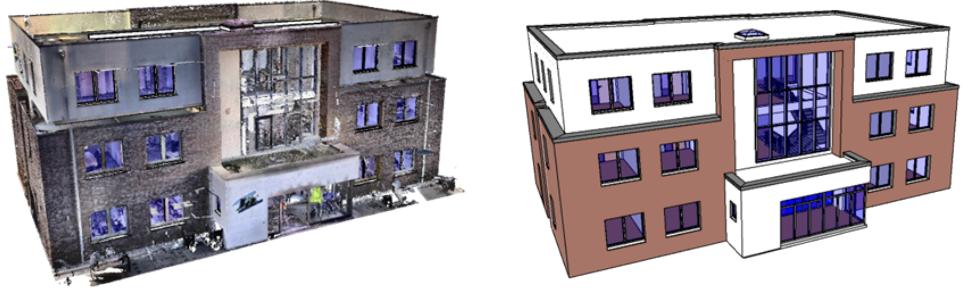
Trainingsdatensätze mit umfangreichen Laserscans, 2D-Plänen und Referenz BIM-Modellen zurück. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit konnte kein repräsentativer Datensatz dieser Art ausgemacht werden. Weiterhin wäre das Training volumetrischer Deep Learning Algorithmen auf solchen Datensätzen unökonomisch. Aus diesem Grund haben wir im Projekt BIMiB alternative Ansätze untersucht, welche auf heuristische Art versuchen, die kognitive Lücke so zu verkleinern, dass das Problem tragbar wird.

### **Beschreibung unseres Ansatzes**

Unser Ansatz für das Scan2BIM-Problem konzentriert sich auf die Integration kognitiver Erkenntnisse und künstlicher Intelligenz zur Verbesserung der Modellerstellung. Wir erkennen die Herausforderung an, dass herkömmliche ML-Verfahren nicht ausreichend die Komplexität und den Kontext von Gebäudedaten erfassen. Daher setzt unser Verfahren auf eine Kombination von Wahrnehmungsprozessen und logischem Schließen, um eine bessere Interpretation von digitalen Bestandsinformationen zu ermöglichen. Durch eine umfassende Analyse des aktuellen Forschungsstandes zu kognitiven Architekturen und der Beobachtung von erfahrenen Modellierern konnten wir einen Prozesszyklus für die BIM-Modellerstellung entwickeln. Dieser Zyklus ermöglicht es uns, die kognitiven Prozesse, die Experten bei der Erstellung realistischer BIM-Modelle aus vorhandenen Daten anwenden, zu verstehen und zu repräsentieren. Im Mittelpunkt dieses Zyklus steht die Identifikation und Analyse der Schlüsselkognitionsfunktionen, die erfahrene Modellierer bei ihrer Arbeit einsetzen. Der Zyklus erlaubt es, den Modellierungsprozess in kleinere, handhabbare Einheiten zu zerlegen und zu untersuchen. Dabei werden die relevanten Komponenten und ihre Interaktionen im Problemlösungsprozess detailliert betrachtet.

### **Datensatz**

Für das Projekt war es notwendig, einen Datensatz zu erstellen, der spezifischen Anforderungen entsprach. Diese Anforderungen umfassten eine angemessene Komplexität des Gebäudes, sowie die durchgängige Verfügbarkeit aller relevanten Daten. Der Datensatz sollte sowohl 2D-Pläne als auch eine 3D-Punktwolke und ein IFC-Modell (Industry Foundation Classes) beinhalten. Da kein vorhandener Datensatz diesen spezifischen Kriterien entsprach, war es notwendig, in Zusammenarbeit mit Projektpartnern einen vollständigen, maßgeschneiderten Datensatz zu erstellen. Diese Zusammenarbeit ermöglichte es, einen Datensatz zu generieren, der den Bedürfnissen des Projekts entsprach. Abbildung 1 visualisiert das Referenzgebäude, dargestellt als eine Punktwolke, die durch Laserscanning des physischen Objekts erfasst wurde, sowie das aus den erfassten Daten mittels der Software Autodesk Revit generierte BIM-Modell.



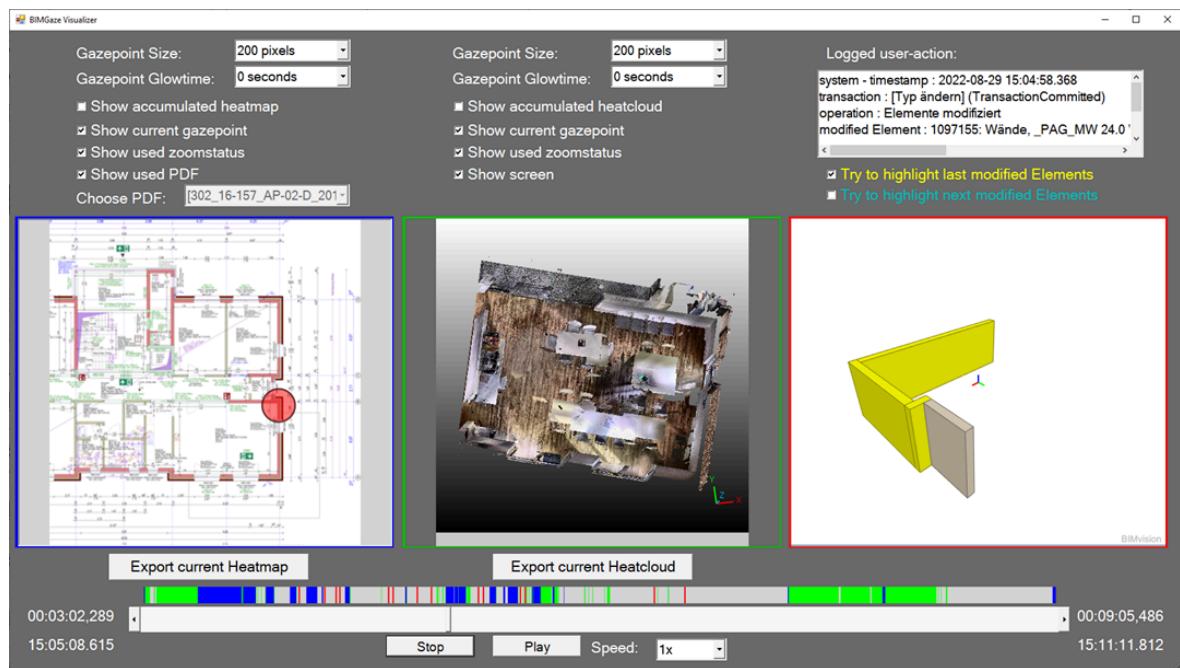
*Abbildung 1: Aufgenommener und registrierter Laserscan des Referenzgebäudes mit zugehörigem BIM-Modell.*

### BIMGaze

BIMGaze [20] ist ein speziell für das Projekt entwickeltes System, das darauf abzielt, den Modellierungsprozess von Building Information Models zu analysieren. Es handelt sich um eine technische Versuchsumgebung, die mit Eyetracking-Technologie ausgestattet ist, um die Interaktion von Modelliererinnen mit 2D-Plänen und 3D-Punktwolken in einer 3D-CAD-Arbeitsumgebung zu erfassen (siehe Abbildung 2). BIMGaze ermöglicht es, kognitive Prozesse während der BIM-Modellierung zu untersuchen, wodurch neue Einblicke in menschliche Suchstrategien und Aufmerksamkeitssteuerung gewonnen werden, die für die Automatisierung des BIM-Prozesses von Bedeutung sind. Das System stellt ein leistungsfähiges Auswertungsmodul bereit, welches Attentionheatmaps vergleichbar mit Salienzkarten sowohl zwei- als auch dreidimensional erzeugen kann (siehe Abbildung 3). Diese Aufmerksamkeitsmuster sind probandenübergreifend aggregierbar. Die Software wurde in einer von uns verfassten Publikation beschrieben und der Forschungsgemeinde zur Verfügung gestellt. Mit diesem Werkzeug werden bisher nicht durchführbare empirische Untersuchungen zum Wirken von Aufmerksamkeit beim Modellierungsprozess möglich.



*Abbildung 2: BIMGaze CAD-Arbeitsplatz zur Durchführung von Eyetracking-Experimenten.*



*Abbildung 3: BIMGaze Visualizer zur empirischen Auswertung durchgeföhrter Experimente.*

## **Rolle Ontologien, Semantic Webtechnologien im Bereich AEC (Architecture, Engineering und Construction)**

Semantische Webtechnologien spielen im Bereich von AEC eine immer größer werdende Rolle, da sie die Wissensdarstellung, Informationsintegration und semantische Interoperabilität erleichtern. Diese Technologien ermöglichen es, komplexe Daten und Informationen effizient zu strukturieren und zugänglich zu machen.

In [19] wurde die Korrelation von Ontologie-Metriken mit den Modellierungsstufen von BIM (siehe Abbildung 4) unter der Verwendung von IFC Daten untersucht. Es wurde festgestellt, dass diese Metriken signifikant auf Änderungen in der geometrischen Komplexitätsebene (LOG) reagieren, während die semantische Komplexität auf der Informationsebene (LOI) weniger beeinflusst wird. Die Ergebnisse zeigen, dass Ontologie-Metriken eine vielversprechende Grundlage für die Weiterentwicklung von BIM-Tools bieten, die Zusammenarbeit und Standardisierung erleichtern könnten.

Trotz der bereits erkennbaren Vorteile ist das volle Potenzial semantischer Webtechnologien im Bereich AEC noch nicht vollständig ausgeschöpft. Es besteht ein großes Entwicklungspotenzial, insbesondere in Bezug auf die Anwendung der Logik zur Verbesserung der automatisierten Entscheidungsfindung und Datenanalyse. Dieses Potenzial soll in weiterer Forschungsarbeit verfolgt und genutzt werden.



*Abbildung 4: Referenzmodell in verschiedenen Modellierungsstufen.*

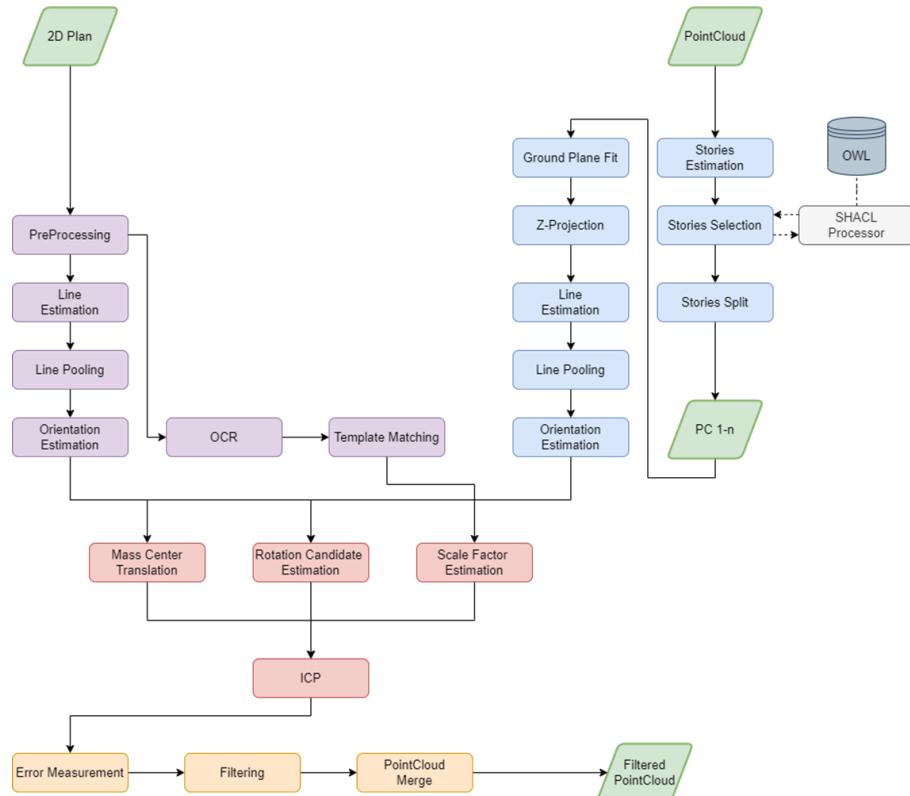
## **Rolle von kognitiven Erkenntnissen in Scan2BIM**

Es wurden Untersuchungen zur Rolle von Ordnungsprinzipien des visuellen Reizstroms im menschlichen Gehirn durchgeführt. Ziel unserer Forschungsfragen war es, Erkenntnisse aus der Kognitionsforschung in den wissensbasierten Ansatz des Projekts zu integrieren. Im Mittelpunkt stand die Evaluierung des Forschungsstandes zu den Prinzipien, nach denen der visuelle Cortex Sinnesreize zu organisieren scheint, insbesondere hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im SCAN2BIM-Prozess. Die Motivation für diesen Ansatz basiert auf der Beobachtung, dass moderne Gebäude oft generalisierungsfähigen Designprinzipien folgen.

Durch die explizite Aufnahme dieser Prinzipien in ein Rekonstruktionssystem kann der Problemraum heuristisch reduziert werden. Dies ermöglicht es, Mustererkennungsalgorithmen effektiver als Generatoren für Protoobjektkandidaten einzusetzen. Anschließend können diese Kandidaten durch ein semantisches Wissensmodell kontextualisiert werden, wodurch die Genauigkeit und Relevanz der Rekonstruktionsergebnisse erhöht wird. Gleichzeitig erlaubt dieser Ansatz die effiziente Integration verschiedener Datenquellen durch die Abstraktion auf wesentliche, gemeinsame Designmuster. Die multi-modale Datenintegration von Bestandsinformationen wird dadurch erleichtert, was die Plausibilisierung der Modellergebnisse durch die Stützung auf Hypothesen erhöhter Signifikanz ermöglicht. Diese Effekte und Methoden wurden im Rahmen des Projekts durch intensive statistische Analyse großer Bestandsdatensätze untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen werden in Kürze veröffentlicht.

## **2D-/3D-Integration und Filterung**

Eines der Ergebnisse unserer vorgenannten Beobachtungen ist die Entwicklung einer fortschrittlichen Verarbeitungspipeline, die es ermöglicht, Gebäudelaserscans und pixelbasierte Grundrisszeichnungen in einem gemeinsamen Modell zu registrieren und zu integrieren. Diese Integration erfolgt durch eine speziell erarbeitete, domänenspezifische Heuristik, die sowohl Effizienz als auch Fehlerreduktion gewährleistet. Der Prozess des Zusammenführens dieser unterschiedlichen Datentypen stellt einen Fortschritt dar, da er es ermöglicht, ein umfassenderes und genaueres Bild der aufgenommenen Gebäudestruktur fehlerrobust zu erhalten. Die detaillierte Struktur und Funktionsweise der Pipeline ist in Abbildung 5 visualisiert. Ein innovatives Element dieser Pipeline ist das probabilistische Filtermodul. Nach erfolgreicher Datenintegration kann dieses Modul aktiviert werden, um nicht-plausibilisierbare Punktkandidaten aus dem Datensatz zu entfernen. Es nutzt dabei mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungen, um die Datenqualität weiter zu verbessern und irrelevante oder fehlerhafte Datenpunkte zu identifizieren und zu eliminieren. Dieses Vorgehen demonstriert den Mehrwert, der durch das Zusammenführen heterogener Bestandsdaten entsteht, im Vergleich zur herkömmlichen Nutzung von einzelnen Datenquellen. Das Ergebnis ist ein präziseres Lidar-Artefakt, welches auf die für den weiteren Modellierungsprozess wesentlichen Inhalte minimalisiert wurde und eine visuelle Reizreduktion für den Modellierer bietet. Zudem ist die folgende Weiternutzung in typischer Anwendersoftware zur Erzeugung von BIM-Modellen weniger ressourcenfördernd.



*Abbildung 5: Datenpipeline für 2D-/3D-Integration und Punktwolken Filterung.*

Unsere Datenpipeline wird in einer Publikation näher erläutert und der Forschungsgemeinde bereitgestellt.

### 2.3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Während der Laufzeit des Projekts wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt, die im Rahmen der Projektforschung parallel an ihren Dissertationen arbeiteten. Zusätzlich wurde eine wissenschaftliche Hilfskraft zur Unterstützung des Teams angestellt. Im Rahmen des Projekts wurden eine Bachelorarbeit betreut, ein Forschungssemester durchgeführt sowie eine studentische Praxisphase begleitet. Trotz intensiver Bemühungen konnte aufgrund der Herausforderungen, die durch die Pandemie und Schwierigkeiten bei der Rekrutierung entstanden, eine zweite Stelle für eine wissenschaftliche Hilfskraft nicht besetzt werden. Diese unbesetzte Stelle führte zu einer Reduzierung der Personalkosten, was es ermöglichte, das Projekt um sechs Monate kostenneutral zu verlängern.

Der starke Preisanstieg im Bereich von Hochleistungsgrafikkarten für Machine-Learning Anwendungen während der Projektlaufzeit erforderte eine finanzielle Umwidmung und Restrukturierung der geplanten Hardwaresysteme. Weiterhin hat die Pandemie eingeplante Forschungshospitationen auf Baustätten der Projektpartner verhindert, wodurch ebenfalls Anpassungen vorgenommen werden mussten.

Die genaue Aufstellung der Mittelverwendung wird im Verwendungsnachweis ersichtlich.

## 2.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das BIMiB-Projekt war notwendig, da es sich mit der Herausforderung befasst, bestehende Gebäudestrukturen effizient in digitale Modelle zu überführen. Dies ist besonders relevant, da ein erheblicher Teil der Bauaufgaben in der Renovierung und Modernisierung bestehender Strukturen besteht. Die präzise und effiziente Digitalisierung von Bestandsgebäuden unterstützt sowohl die Planung als auch die Durchführung von Umbauten, Renovierungen und Erweiterungen. Die durchgeführten Arbeiten im Rahmen des Projekts, wie die Entwicklung von Methoden zur Verarbeitung von 3D-Laserscans und digitalisierten Papierplänen, sind für Forschung und Industrie relevant, da sie die Grundlage für eine präzisere und effektivere Planung im Bauwesen legen. Diese Technologien helfen dabei, Zeit und Ressourcen zu sparen und tragen zur Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Bauprojekten bei. Das Projekt zeichnet sich durch eine interdisziplinären Herangehensweise aus, die sowohl technologische Innovationen als auch praktische Anwendbarkeit in der Bauindustrie berücksichtigt. Die Einbindung von Industriepartnern und die Fokussierung auf realistische Anwendungsszenarien sorgten dafür, dass die Ergebnisse des Projekts für den Wirtschaftsstandort relevant und zeitnah umsetzbar sind. BIMiB adressiert eine wichtige Lücke im Bereich des Building Information Modeling und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung einer niederschwelligeren Nutzbarkeit von Scan2BIM-Technologien. Diese Art der Innovation kann signifikante Verbesserungen in der Produktivität und Nachhaltigkeit des Bestandsbaus bewirken, was ohne solche risikobehafteten Forschungsanstrengungen möglicherweise unerreicht bliebe. Die Entwicklung umweltfreundlicherer und nachhaltigerer Bauweisen ist ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigeren Gesellschaft, welche Ressourcen schont und die Umweltbelastung reduziert. Eine Verbindung von akademischer Forschung und praktischer Anwendung stellt eine bedeutende Chance für Wissenstransfer dar. Dieses Wissen kann von der Industrie genutzt werden, um innovative Bauprozesse und -technologien zu entwickeln, was letztendlich die Wirtschaft stärkt und ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit erhöht.

Das BIMiB-Projekt, charakterisiert durch seine große Komplexität und die anspruchsvollen technologischen Herausforderungen und Unsicherheiten, erforderte eine Durchführung, die über die Risikokapazitäten einer einzelnen Organisationen hinausging. Diese Notwendigkeit führte zur Bildung einer Kooperation zwischen dem Institut für intelligente Gebäude und den Industriepartnern Pape und HOCHTIEF ViCon, eine Zusammenarbeit, die für das Gelingen des Projekts unerlässlich war. Das akademische Forschungsinstitut brachte für die

Entwicklung der komplexen wissenschaftlichen Grundlagen des Projekts sein tiefgreifendes theoretisches Wissen und seine Forschungsexpertise ein. Gleichzeitig ermöglichten die Industriepartner durch ihre praktische Erfahrung und Ressourcen die Umsetzung und Anwendung der Forschungsergebnisse in realen Szenarien. Diese synergetische Partnerschaft erlaubte es, die vielschichtigen Aspekte des Projekts – von der Grundlagenforschung bis hin zur praktischen Anwendung – effektiv zu adressieren und zu bewältigen. Die Kooperation zwischen Akademie und Industrie stellte somit sicher, dass das BIMiB-Projekt nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis erfolgreich umgesetzt werden konnte, und demonstriert die Bedeutung interdisziplinärer Zusammenarbeit bei der Bewältigung komplexer wissenschaftlicher und technologischer Herausforderungen.

## 2.5. Verwertbarkeit des Projektergebnisses

Die Resultate des BIMiB-Projekts bieten vielfältige Möglichkeiten für zukünftige Nutzungen und Verwertungen. Es wurden bereits Publikationen veröffentlicht, die die Forschungsergebnisse einem breiten wissenschaftlichen Publikum zugänglich machen. Weitere Veröffentlichungen sind in Planung. Während der Projektlaufzeit wurde zur Einbindung und Förderung des akademischen Nachwuchses eine Bachelorarbeit erfolgreich bearbeitet und ein studentisches Forschungssemester betreut. Zwei Dissertationen, die sich auf die Forschungsstränge des Projektes konzentrieren, werden derzeit angefertigt. Diese Arbeiten tragen dazu bei, das Wissen und die Methoden des Projekts weiter zu vertiefen und zu spezifizieren. Am Institut für intelligente Gebäude werden die im Projekt entwickelten Artefakte in zukünftigen Projekten eingesetzt, wodurch die Nachhaltigkeit und der langfristige Einfluss der Forschungsergebnisse sichergestellt werden soll. Zukünftige Projekte am Institut sollen die Konzepte aus BIMiB aufgreifen und weiterentwickeln. Das im Rahmen des Projekts entwickelte Eyetracking-System stellt ein besonders vielversprechendes Tool dar. Es kann in wesentlich erweiterten Forschungsscopes für neuartige Untersuchungen eingesetzt werden, was das Potenzial hat, die Forschung in diesem Bereich grundlegend zu bereichern und zu erweitern. Zudem wurde ein eigens erstellter und konsolidierter Experimentaldatensatz unter realistischen Bedingungen zusammengetragen. Der hohe Aufwand bei der Modellierung und Integration dieser Daten wird durch die Veröffentlichung unserer Arbeit anderen Forschungsgruppen abgenommen, was den Weg für weitere innovative Forschungen öffnet. Die Konzepte des Projektes wurden auch vor Interessengruppen der Industrie präsentiert (z.B. Verbund buildingSMART). Diese Vorträge stießen auf großes Interesse und Aufmerksamkeit, was die praktische Relevanz und Anwendbarkeit unserer Forschungsergebnisse unterstreicht. Insbesondere zeigten die kooperierenden Industriepartner Interesse an der Verwertung der effizienten

Lidar-Filterverfahren. Aktuell laufen Gespräche über mögliche weitere Zusammenarbeiten und Verwertungskonzepte, was das Potenzial für eine direkte Anwendung unserer Forschungsergebnisse in der Industrie deutlich macht.

## 2.6. Während des Projekts bekannt gewordene Fortschritte Dritter

Während der Laufzeit des BIMiB-Projekts wurden die Entwicklungen in verwandten Forschungsfeldern kontinuierlich verfolgt. Dabei sind während dieses Zeitraums keine Fortschritte von Drittparteien bekannt geworden, die einen ähnlichen Ansatz wie BIMiB verfolgen.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang das Projekt BIMKIT[22] der Ruhr-Universität Bochum. BIMKIT beschäftigt sich ebenfalls mit Problemen im Scan2BIM-Prozess, setzt jedoch andere Schwerpunkte. Der Fokus des BIMKIT-Projekts liegt verstärkt auf der Anwendung von BIM-Technologien im Bereich Brücken und Infrastruktur sowie auf baulichen Managementaspekten. Obwohl BIMKIT einige verwandte Herausforderungen im Scan2BIM-Prozess adressiert, unterscheidet sich der Ansatz deutlich von dem des BIMiB-Projekts, insbesondere in Bezug auf die Anwendungsgebiete und spezifischen Zielsetzungen.

## 2.7. Gesamtbewertung

Das BIMiB-Projekt stellt in seiner Gesamtheit einen bedeutenden Meilenstein sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Anwendung im Bereich des Building Information Modeling dar. Es hat einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung fortschrittlicher Technologien und Methoden im Bereich der digitalen Erfassung und Modellierung von Gebäuden geleistet, wobei der Schwerpunkt auf der effizienten Nutzung und Modernisierung bestehender Strukturen lag. Besonders hervorzuheben ist die herausragende Zusammenarbeit zwischen dem Institut für intelligente Gebäude und den Industriepartnern. Diese Kooperation war geprägt von einer produktiven Arbeitsatmosphäre, gegenseitigem Respekt und einem kontinuierlichen, offenen Informationsaustausch. Die gute Kommunikation hat ermöglicht, dass alle Beteiligten effektiv und zielgerichtet zusammenarbeiten konnten.

Die positive Erfahrung und der Erfolg des Projekts haben eine solide Grundlage für zukünftige Kooperationen geschaffen. Die Partner sind motiviert, ihre Zusammenarbeit fortzusetzen und auf die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aufzubauen. Es besteht ein starkes Interesse, diese erfolgreiche Partnerschaft in weiteren Forschungsprojekten fortzuführen und möglicherweise in Ausgründungen zu überführen. Dies unterstreicht das Potenzial für eine langfristige und fruchtbare Zusammenarbeit, die nicht nur die Grenzen der Forschung erweitert, sondern auch konkrete, innovative Lösungen

für die Industrie hervorbringt. Insgesamt kann das BIMiB-Projekt als ein erfolgreiche Verbindung von akademischer Forschung und industrieller Anwendung angesehen werden, welche positiv zur Weiterentwicklung des Bauwesens beiträgt.

## 2.8. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

S. Dierssen, M. Cichonczyk, U. Weitkemper, and D. Becking (2022).  
“Linking ontology metrics with BIM modeling stages.”  
In Proceedings of 33. Forum Bauinformatik.

T. Niemeier, M. Cichonczyk, S. Dierssen, U. Weitkemper, and D. Becking (2022).  
“BIMGaze-Eine Versuchsumgebung zur datenanalytischen Beobachtung von  
BIM-Modellierungsprozessen.”  
In Proceedings of 33. Forum Bauinformatik.

T. Niemeier (2023).  
“Konzeption und Test einer Integrationspipeline für das 2D/3D-Alignment  
von Gebäudebestandsdaten”  
Bachelorarbeit, HSBI Campus Minden.

Zwei weitere Konferenz- bzw. Journalbeiträge werden derzeit erstellt

Zwei aktuell in Ausarbeitung befindliche Dissertationen sollen sich dem Projektergebnis  
anschließen.

## Referenzen

- [1] Pizarro, P. N., Hitschfeld, N., Sipiran, I., & Saavedra, J. M. (2022). Automatic floor plan analysis and recognition. In Automation in Construction (Vol. 140, p. 104348). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104348>
- [2] Lv, X., Zhao, S., Yu, X., & Zhao, B. (2021). Residential floor plan recognition and reconstruction. In 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cvpr46437.2021.01644>
- [3] Schönfelder, P., Stebel, F., Andreou, N., & König, M. (2024). Deep learning-based text detection and recognition on architectural floor plans. In Automation in Construction (Vol. 157, p. 105156). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105156>
- [4] Zeng, Z., Li, X., Yu, Y. K., & Fu, C.-W. (2019). Deep Floor Plan Recognition Using a Multi-Task Network With Room-Boundary-Guided Attention. In 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00919>
- [5] Wang, Z., & Sun, N. (2023). Offset-Guided Attention Network for Room-Level Aware Floor Plan Segmentation. In IEEE Access (Vol. 11, pp. 63667–63677). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2023.3288598>
- [6] Han, L., Qiao, H., Guo, H., & Liu, M. (2023). Multitask floor plan analysis based on multi-scale and self-attention. In C. Zuo (Ed.), International Conference on Remote Sensing, Surveying, and Mapping (RSSM 2023). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2682661>
- [7] Yang, B., Jiang, H., Pan, H., & Xiao, J. (2023). VectorFloorSeg: Two-Stream Graph Attention Network for Vectorized Roughcast Floorplan Segmentation. In 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cvpr52729.2023.00137>

- [8] Faltin, B., Schönfelder, P., & König, M. (2023). Inferring Interconnections of Construction Drawings for Bridges Using Deep Learning-based Methods. In ECPPM 2022 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction 2022 (pp. 343–350). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003354222-44>
- [9] Wen, T., Liang, C., Fu, Y.-M., Xiao, C.-X., & Xiang, H.-M. (2023). Floor Plan Analysis and Vectorization with Multimodal Information. In MultiMedia Modeling (pp. 282–293). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-27077-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-27077-2_22)
- [10] Abreu, N., Pinto, A., Matos, A., & Pires, M. (2023). Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review. In ISPRS International Journal of Geo-Information (Vol. 12, Issue 7, p. 260). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070260>
- [11] Ponciano, J.-J., Tréneau, A., & Boochs, F. (2019). Automatic Detection of Objects in 3D Point Clouds Based on Exclusively Semantic Guided Processes. In ISPRS International Journal of Geo-Information (Vol. 8, Issue 10, p. 442). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijgi8100442>
- [12] Ponciano, J.-J., Roetner, M., Reiterer, A., & Boochs, F. (2021). Object Semantic Segmentation in Point Clouds—Comparison of a Deep Learning and a Knowledge-Based Method. In ISPRS International Journal of Geo-Information (Vol. 10, Issue 4, p. 256). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040256>
- [13] Armeni, I., Sener, O., Zamir, A. R., Jiang, H., Brilakis, I., Fischer, M., & Savarese, S. (2016). 3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces. In 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.170>
- [14] Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., & Véron, P. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. In Remote Sensing (Vol. 13, Issue 3, p. 461). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs13030461>
- [15] Tang, S., Li, X., Zheng, X., Wu, B., Wang, W., & Zhang, Y. (2022). BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach. In Automation in Construction (Vol. 141, p. 104422). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104422>

- [16] Wang, Q., Guo, J., & Kim, M.-K. (2019). An Application Oriented Scan-to-BIM Framework. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 3, p. 365). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs11030365>
- [17] Barbosa, M. J., Pauwels, P., Ferreira, V., & Mateus, L. (2016). Towards increased BIM usage for existing building interventions. In *Structural Survey* (Vol. 34, Issue 2, pp. 168–190). Emerald. <https://doi.org/10.1108/ss-01-2015-0002>
- [18] Werbrouck, J., Pauwels, P., Bonduel, M., Beetz, J., & Bekers, W. (2020). Scan-to-graph: Semantic enrichment of existing building geometry. In *Automation in Construction* (Vol. 119, p. 103286). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103286>
- [19] Dierssen, S., Cichonczyk, M., Weitkemper, U., & Becking, D. (2022). Linking ontology metrics with BIM modeling stages. In *Proceedings of 33. Forum Bauinformatik*.
- [20] Niemeier, T., Cichonczyk, M., Dierssen, S., Weitkemper, U., & Becking, D. (2022). BIMGaze-Eine Versuchsumgebung zur datenanalytischen Beobachtung von BIM-Modellierungsprozessen. In *Proceedings of 33. Forum Bauinformatik*.
- [21] Kalervo, A., Ylioinas, J., Häikiö, M., Karhu, A., & Kannala, J. (2019). CubiCasa5K: A Dataset and an Improved Multi-task Model for Floorplan Image Analysis. In *Image Analysis* (pp. 28–40). Springer International Publishing.
- [22] BIMKIT. <https://bimkit.eu/> [Abgerufen am 3. März, 2024]