
Entwicklung von Verfahren zur (teil-)automatisierten Erstellung von BIM-Model- len für Straßenbrücken im Bestand

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Entwicklung von Verfahren zur (teil-) automatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand

von

Rade Hajdin, Lazar Rakić, Holger Diederich, Nikola Tanasić
Infrastructure Management Consultants GmbH, Mannheim

Rico Richter, Justus Hildebrand, Sebastian Schulz
Hasso-Plattner-Institut, Potsdam

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 02.0436
Entwicklung von Verfahren zur (teil-)automatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand

Fachbetreuung:
Jennifer Bednorz

Referat:
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 – 0

DOI: <https://doi.org/10.60850/fv-b-02.0436>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Entwicklung von Verfahren zur teilautomatisierten Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand

FE 02.0436/2020/ARB

Kurzfassung

Die Anwendung von Building Information Modelling (BIM) im Infrastrukturmanagement wird derzeit intensiv erforscht. Aufgrund ihres individuellen Charakters, der komplexen Geometrie und der Vielzahl ihrer Bestandteile ist die automatisierte Erfassung von Brücken besonders komplex. Eine manuelle Erstellung entsprechender BIM-Modelle auf Grundlage vorhandener 2D-Pläne und Datenbanken ist angesichts der Menge und Komplexität ein erheblicher Aufwand und birgt vielfältige Herausforderungen: Fehlende, unleserliche oder widersprüchliche Plangrundlagen, undokumentierte Projektänderungen oder Erweiterungen am Bauwerk. Mit jüngsten Entwicklungen bei den 3D-Vermessungstechnologien und Fortschritten im Bereich der Künstlichen Intelligenz ergeben sich neue Möglichkeiten, um Prozesse und Verfahren für eine automatisierte Generierung von BIM-Modellen für Brücken im Bestand zu entwickeln und diese auf reale Brückenbauwerke anzuwenden.

In diesem Forschungsprojekt wurde ein neuartiger, modularer Ansatz für die teil-automatisierte Umwandlung von Punktwolken in Ist-BIM-Modelle erarbeitet. Der Ansatz basiert auf einer Kombination von Anwendungen Künstlicher Intelligenz und heuristischen Algorithmen. Neuronale Netze wurden mit synthetischen sowie realen Datensätzen typischer Brückenelemente trainiert und an Punktwolken tatsächlicher Bauwerke getestet. Die erkannten Brückenelemente werden in ein trianguliertes Oberflächennetz umgewandelt. Anschließend können Volumenelemente mittlerer geometrischer Komplexität generiert werden. Das Endergebnis ist ein Ist-BIM-Modell einer Brücke und ihrer Elemente, angereichert mit semantischen Informationen aus einer Bauwerksdatenbank (z. B. Typ, Eigenschaft, Beziehung, Material), im standardisierten und offenen IFC-Format (Industry Foundation Classes) für den Austausch von Gebäudemodellen. Das vorgeschlagene Konzept soll als Basis für künftige, großangelegte automatisierte Erfassungskampagnen von Ist-BIM-Modellen von Brücken im Bestand für zukunftsfähige Brückenmanagementsysteme dienen.

Development of procedures for the semi-automated construction of BIM models for existing road bridges

FE 02.0436/2020/ARB

Abstract

The application of Building Information Modelling (BIM) in infrastructure asset management is being increasingly investigated. BIM involves generation of digital asset models, which are envisioned to facilitate and foster current management practices. For this cause, it is necessary to perform digitalization of asset inventories, where bridges are particularly difficult to process due to complex geometry and variety of elements. The manual creation of related BIM models based on existing 2D plans and databases is especially for older bridges infeasible due to missing information, might be time-consuming and is on many occasions unreliable as the data at hand might not represent the actual as-is bridge state. Given the prominent maturity of 3D surveying technologies and the recent advancements in the field of artificial intelligence, new possibilities emerge for the development of methods for an automated generation of as-is bridge BIM models.

This research project presents a novel, modular framework for an automatic transformation of point clouds obtained by 3D surveying into as-is BIM models. The framework is based on a fusion of artificial intelligence and heuristic algorithms. The synthetic datasets with typical bridge elements as well as real bridge point clouds were used for the purpose of neural network training. The results from the trained neural network have been complemented with geometric-based heuristic rules to identify and segment bridge elements from point clouds. Each of these bridge elements is then transformed into a triangulated surface mesh. Subsequently, solid bridge elements of middle geometric complexity levels can be generated. The final result is an as-is BIM model of a bridge and its elements, enriched with semantic information from building data base (e.g., type, property, relationship, material), in the standardized vendor-free Industry Foundation Classes (IFC) building model exchange format. The proposed concept is intended to serve as the basis for future, large-scale automated acquisition campaigns of as-built BIM models of existing bridges for bridge management systems.

Kurzbericht

Entwicklung von Verfahren zur Erstellung von BIM-Modellen für Straßenbrücken im Bestand

1 Aufgabenstellung

In Übereinstimmung mit dem Masterplan BIM Bundesfernstraßen des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr ist seit 2021 vorgesehen, dass Neubauprojekte auf Grundlage von digitalen Bauwerksmodellen geplant und gebaut werden und diese Bauwerksmodelle für den Betrieb und die Erhaltung weitergenutzt werden können.

Der Nutzen der Digitalisierung für Prozesse in Betrieb und Erhaltung kann jedoch erst dann voll ausgeschöpft werden, wenn auch für die Bestandsbauwerke BIM-Modelle (Building Information Modeling) vorliegen. Eine manuelle Digitalisierung vorhandener 2D-Pläne ist je nach Lesbarkeit und Vollständigkeit der Pläne aufwändig oder nur eingeschränkt möglich. Zudem repräsentiert das aus Plänen abgeleitete Modell oft lediglich den Planungsstand und nicht den tatsächlichen Ist-Zustand.

Im Rahmen dieses Projekts bestand die Aufgabe darin, ein Konzept zur (teil-)automatisierten Erstellung von BIM-Modellen aus Punktwolken (der sogenannte Scan2BIM Prozess) für Straßenbrücken zu entwickeln, welches als Basis für eine flächendeckende Erfassung des Brückenbestands dienen kann. Der Ist-Zustand der Brückengeometrie wird dabei aus 3D-Punktwolken abgeleitet, die effizient mit moderner Vermessungstechnik gewonnen werden können. Für die Erkennung von Bauteilen sollten die Möglichkeiten und Grenzen von KI-Verfahren (Künstliche Intelligenz) erprobt werden. Zudem sollten geometrische Darstellungen aus den erkannten Punktwolkenclustern der Bauteile abgeleitet und zusätzlich mit Daten aus SIB-Bauwerke (Bauwerksdatenbank) angereichert werden. Die Praxistauglichkeit des Konzepts sollte innerhalb des Projekts an einer Beispielanwendung an Bestandsbrücken des Bundesfernstraßennetzes nachgewiesen werden.

2 Grundlagen und Anforderungsanalyse

Die wichtigsten Grundlagen, die zum Verständnis des gesamten Scan2BIM Prozesses erforderlich sind, wurden innerhalb des Projekts recherchiert und ausgewertet. Diese Grundlagen beinhalten Aspekte der Vermessungstechnik und der Datenverarbeitung von Algorithmen und BIM-Modellen.

Es wurden 3D-Punktwolken von Brückenaufnahmen, die mit LiDAR-Systemen und fotogrammetrisch erfasst wurden, evaluiert und hinsichtlich der Datenqualität bewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere LiDAR-Daten die notwendige Qualität für die weitere Verarbeitung und Auswertung mit Verfahren der Künstlichen Intelligenz liefern. KI-Verfahren zur Digitalisierung der gebauten Umwelt gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie die notwendige Automatisierung liefern können, um flächendeckend BIM-Modelle zu erzeugen. Insbesondere Methoden und Ansätze von Deep Learning (DL), ein Teilgebiet der KI, sind hier vielversprechend. Auf Basis von Trainingsdaten können Bauteile in den erfassten 3D-Punktwolken anhand der KI erkannt werden, so dass der Automatisierungsgrad des Scan2BIM-Prozesses gesteigert wird.

Das BIM-Modell kann ein Bauwerk als digitalen Zwilling abbilden und stellt ein umfassendes Verzeichnis von verschiedenen Informationen über das Bauwerk dar. Das Merkmal, für welches die BIM-Methodik am bekanntesten ist, ist die visuelle 3D-Darstellung der einzelnen Bauteile mit entsprechenden Fachinformati-

onen. Die Genauigkeit der Bauwerksdarstellung im BIM-Modell kann von rein konzeptionell bis hoch detailliert variieren und wird durch den Level-Of-Detail (LOD) definiert. Für dieses Projekt wurden je nach Verfügbarkeit der Daten in SIB-Bauwerke verschiedene LODs gewählt.

Aus Punktwolken können unter Verwendung von geometrischen Rekonstruktionsansätzen 3D-Darstellungen abgeleitet werden, die für BIM-Modelle geeignet sind. Methoden zur Oberflächenrekonstruktion ermöglichen die Generierung von Oberflächenmodellen, z. B. in Form von Dreiecksnetzen (Mesh). Verfahren zur Querschnittserkennung und dazu gehöriges Extrudieren ermöglichen die Generierung von Volumenmodellen, z. B. in Form von Grenzdarstellungen (BRep). Diese Methoden wurden in Bezug auf ihre Praxistauglichkeit bewertet und eine Auswahl davon im Prototyp implementiert.

Die relevanten Datenbanken (Bauwerksdatenbank von Bund und Ländern - SIB-Bauwerke) und geographische Informationssysteme (Bundesinformationssystem Straße - BISStra) wurden analysiert und ausgewählte Informationen daraus in die Modellbildung einbezogen. Auf Grundlage der Ontologie in SIB-Bauwerke wurde eine feingliedrige Unterteilung der Elemente im BIM-Modell umgesetzt, so dass jedes Element im BIM-Modell mit den entsprechenden Daten aus SIB-Bauwerke (z. B. Typ, Materialien, Zustand, Maßnahmen usw.) verknüpft werden kann. Die Elemente im BIM-Modell werden anhand der Richtung der vom Bauwerk getragenen Achse aus BISStra nummeriert.

3 Methodik, Prototyp und Beispielanwendung

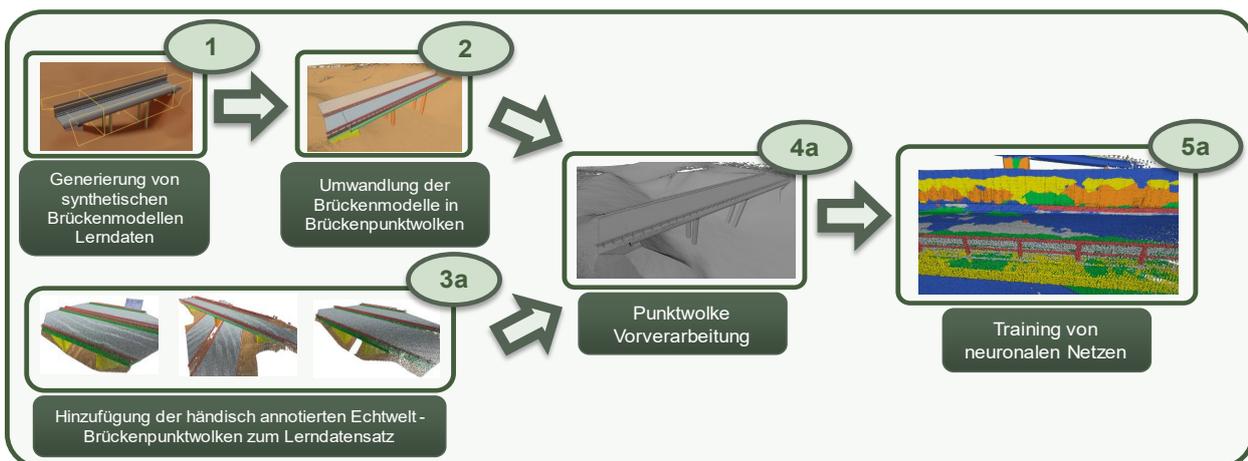


Abbildung 1 Entwickelte Verfahren für die teil-automatisierte Erstellung von BIM-Modellen aus 3D-Punktwolken für Straßenbrücken im Bestand. Erste Gruppe: Training

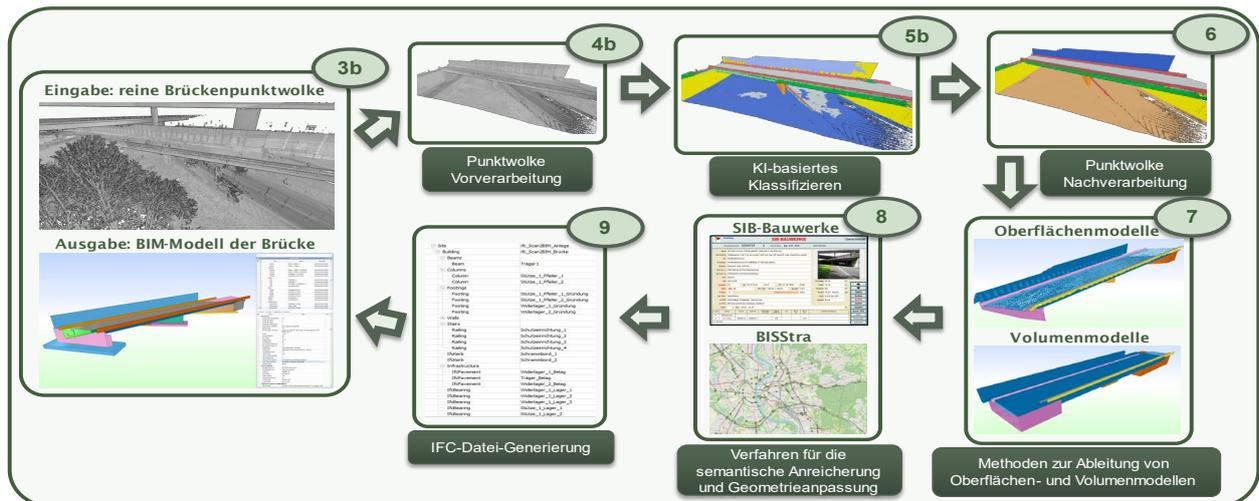


Abbildung 2 Entwickelte Verfahren für die teil-automatisierte Erstellung von BIM-Modellen aus 3D-Punktwolken für Straßenbrücken im Bestand. Zweite Gruppe: Anwendung

In diesem Forschungsprojekt wurden Verfahren für die teil-automatisierte Erstellung von BIM-Modellen aus 3D-Punktwolken konzipiert, implementiert und erprobt. Die entwickelten Konzepte basieren auf einer Kombination von KI-Verfahren, geometrischer Segmentierung und heuristischen Algorithmen zur Gewinnung von Volumenmodellen und lassen sich insgesamt in neun aufeinanderfolgende Arbeitsschritte unterteilen (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Die Arbeitsschritte 1, 2, 3a, 4a und 5a (Abbildung 1) gehören zur ersten Gruppe der im Forschungsprojekt entwickelten Verfahren, nämlich dem Training von neuronalen Netzen. Dies enthält auch die Erstellung eines Lerndatensatzes. Die Arbeitsschritte 3b, 4b, 5b, 6, 7, 8 und 9 (Abbildung 2) gehören zur zweiten Gruppe der entwickelten Verfahren, nämlich der Anwendung des Scan2BIM-Prozesses. Diese beinhaltet die teil-automatisierte Erstellung von BIM-Modellen aus 3D-Punktwolken. Alle neun Arbeitsschritte des Verfahrens werden im Folgenden beschrieben.

Arbeitsschritt 1: Generierung von Brückenmodellen als Lerndaten.

Für die Anwendung von KI-Verfahren sind Trainingsdaten unerlässlich. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden deshalb 3D-Brückenmodelle für die Generierung von synthetischen Trainingsdaten genutzt. Hierfür werden Brückenmodelle mit entsprechender Semantik je Bauteil generiert, die eine Vielzahl der bestehenden Straßenbrücken repräsentieren. Die Brückenmodelle werden durch Kombination typischer Bauteile aus der eigens erstellten Bauteildatenbank erstellt. Die Brückenmodelle für die Erstellung der Trainingsdaten werden so strukturiert, dass sie mit den Daten aus SIB-Bauwerke verknüpft werden können. In der Regel wird ein Bauteil aus SIB-Bauwerke durch ein oder mehrere Elemente im BIM-Modell repräsentiert.

Arbeitsschritt 2: Umwandlung der Brückenmodelle in Brückenpunktwolken.

Die generierten Brückenmodelle werden virtuell gescannt und in annotierte Punktwolken umgewandelt, um für das Training der neuronalen Netze verwendet werden zu können. Das virtuelle Scannen ist notwendig, damit die Charakteristik der Trainingsdaten so weit wie möglich denen von realen Scans entspricht. Es werden LiDAR-Scans entlang von virtuellen Befliegungsrouten sowie terrestrische Erfassungen simuliert.

Arbeitsschritt 3: Hinzufügung der händisch annotierten Echtwelt-Brückenpunktwolken zum Lerndatensatz.

Neben den generierten Brückenmodellen werden weitere Trainingsdaten durch das Annotieren von drei Echtwelt-Brückenpunktwolken (Arbeitsschritt 3a) erstellt, damit eine künftige Anwendung auf die Echtwelt-

Brückenpunktwolken eine hohe Klassifizierungsqualität liefern kann. Jeder Punkt wird mit Informationen über das entsprechende Bauteil, zu dem er gehört, angereichert.

Bei der Klassifikation (Abbildung 2) fließen die unverarbeitete Brückenpunktwolken direkt in die Verarbeitungskette ein (Arbeitsschritt 3b). Ihre Verarbeitung wird im Arbeitsschritt 4b fortgesetzt.

Arbeitsschritt 4: Punktwolke Vorverarbeitung.

3D-Punktwolken zeichnen sich durch ihren hohen Speicherbedarf, fehlende Struktur der Rohdaten sowie unterschiedliche Auflösung, Dichte und Genauigkeit aus. Für die Scandaten werden verschiedene Vorverarbeitungs- und Filterschritte umgesetzt, um die Datenqualität zu verbessern. Somit kann eine Mindestqualität der Daten, indem Ausreißer, Duplikate und bewegliche Objekte entfernt wurden, sichergestellt werden. Die Trainingsdaten der synthetischen Punktwolken durchlaufen nur wenige Vorverarbeitungsschritte (Arbeitsschritt 4a), während für den Anwendungsfall, der von einem unbearbeiteten Echtwelt-Brückenscan ausgeht, komplexere Vorverarbeitungsschritte erforderlich sind (Arbeitsschritt 4b).

Arbeitsschritt 5: Training von neuronalen Netzen und KI-basiertes Klassifizieren.

Die KI-basierte Klassifikation (Arbeitsschritt 5b) arbeitet mit den vorverarbeiteten Eingabedaten und ermittelt für jeden Punkt der Punktwolke die wahrscheinlichste Klasse (Lager, Träger usw.). Die KI nutzt dabei neuronale Netze, die mit Hilfe der Trainingsdaten aus synthetischen und Echtwelt-Punktwolken trainiert wurden (Arbeitsschritt 5a). Die KI arbeitet die Punktwolke Punkt für Punkt ab und untersucht für jeden Punkt Lage und Verteilung der Nachbarpunkte. So kann eine Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit eines Punktes zu einem Bauteil bestimmt werden und die gesamte Punktwolke in Punktcluster segmentiert werden, die zu verschiedenen Bauteilklassen gehören.

Arbeitsschritt 6: Punktwolke Nachverarbeitung.

Die Nachverarbeitung der 3D-Punktwolken ist notwendig, da die KI-basierte Klassifikation besonders in Grenzbereichen einzelne Punkte fehlerhaft klassifizieren kann. Durch die Anwendung von verschiedenen Analyseverfahren (z. B. Segmentierung, Voting usw.) werden Punkte und Punktgruppen bezüglich der durch die KI zugeordneten Klassen auf Plausibilität geprüft und bei Bedarf korrigiert. Die Punktwolken mit den Klasseninformationen sind dann die Ausgangsdaten, um die Oberflächen- und Volumenmodelle abzuleiten.

Arbeitsschritt 7: Methoden zur Ableitung von Oberflächen- und Volumenmodellen.

Für die Weiterverwendung im BIM-Modell sind Punktwolken keine geeignete Repräsentation, weshalb die Ableitung von Oberflächen- und Volumenmodellen aus den Punktwolken notwendig ist. Die segmentierten Punktcluster werden in eine für die geometrischen Rekonstruktionsalgorithmen geeignete Form überführt. Dazu werden einzelne Bauteile geclustert, Zwillingenbrücken getrennt, die Bauwerke ausgerichtet, Bauteilklassen weiter unterteilt und Punktcluster anhand der Richtung der Bauwerksachse durchnummeriert und bezeichnet. Anschließend werden verschiedene Methoden der Oberflächenrekonstruktion genutzt, um 3D-Geometrien zu erzeugen. Diese 3D-Geometrien bilden zwar die Oberfläche sehr detailgetreu ab, besitzen jedoch kein Volumen und sind für die weitere Verwendung nur bedingt geeignet. Daher wurden Methoden zur Erkennung von Querschnitt und Extrusionsrichtung der einzelnen Bauteile entwickelt, um Volumenmodelle zu erzeugen. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes sind die Oberflächen- und Volumenmodelle des Bauwerks.

Arbeitsschritt 8: Verfahren für die semantische Anreicherung und Geometrieangepassung.

Es wurde zusätzlich ein Verfahren entwickelt, um das aus den Punktwolken abgeleitete BIM-Modell mit Informationen aus SIB-Bauwerke anzureichern, z. B. indem die Nummerierung der Bauteile anhand der algorithmisch bestimmten Bauwerksrichtung erfolgt, verschiedene Informationen hinzugefügt werden (z. B.

Typ, Bauart, Beziehung, Material), sowie visuell nicht erfassbare Geometrien (z. B. Belagsdicke) oder Bauteile (z. B. Abdichtungen und Gründungen) ergänzt werden. Die üblichen Brückeneigenschaften und Standardwerte werden definiert, um die verbleibenden Fehler in den geometrischen Darstellungen der Brücken zu beseitigen und detailliertere Geometrien erzeugen zu können. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes sind algorithmisch verbesserte Geometrien der Bauteile sowie deren Zusammenfügung zu einem 3D-Brückenmodell.

Arbeitsschritt 9: IFC-Datei-Generierung.

In diesem Arbeitsschritt werden entsprechende IFC-Hierarchien der Bauteile erstellt und die zusätzlichen Informationen den IFC-Elementen zugewiesen. Schließlich werden alle Bauteile in einer Brückendarstellung zusammengeführt und als Ausgabe wird das Endprodukt des entwickelten Verfahrens, ein BIM-Modell im IFC-Format, erzeugt. Da aus Arbeitsschritt 7 je nach gewählter Methode unterschiedliche geometrische Darstellungen resultieren, können mehrere Varianten von BIM-Modellen im IFC-Format exportiert werden.

Die Praxistauglichkeit wird demonstriert, indem ein Ist-BIM-Modell für reale Brücken mit den anhand der KI segmentierten Bauteilen, angereichert mit semantischen Informationen aus der SIB-Bauwerke Datenbank erzeugt und im standardisierten und offenen IFC-Format abgeleitet wird. Innerhalb der modularen Prozesskette (Abbildung 2) werden standardisierte Ein- und Ausgabeformate verwendet, so dass eine spätere Erweiterung, Optimierung oder das Ersetzen von Komponenten im Rahmen einer Weiterentwicklung möglich ist. Eine Ansicht der generierten Ist-BIM-Modelle von zwei realen Brücken des Bundesfernstraßennetzes ist in Abbildung 3 visualisiert.

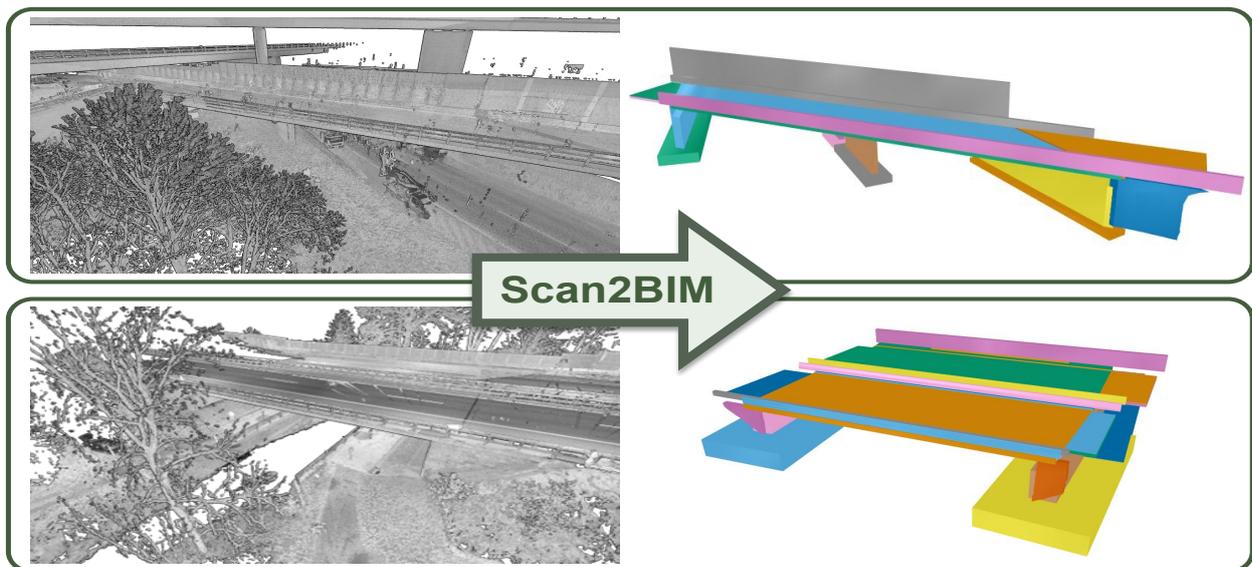


Abbildung 3 Die abgeleiteten BIM-Modelle aus zwei realen Brückenpunktwolken

4 Auswirkungen auf die Praxis

In diesem Forschungsprojekt wurde ein neuartiger, modularer Ansatz für die (teil-)automatisierte Umwandlung von Punktwolken in BIM-Modelle erarbeitet. Der Ansatz basiert auf einer Kombination der Anwendung von Künstlicher Intelligenz und heuristischen Algorithmen. Neuronale Netze wurden mit synthetischen sowie realen Datensätzen typischer Bauteile trainiert und an Punktwolken tatsächlicher Bauwerke getestet. Die erkannten Bauteile werden in ein trianguliertes Oberflächennetz umgewandelt und anschließend Volumenelemente generiert. Das Endergebnis ist ein Ist-BIM-Modell einer Brücke und ihrer Bauteile, angereichert mit semantischen Informationen aus SIB-Bauwerke und BISStra im offenen IFC-Format.

Die entwickelten Prozesse für die Ableitung von BIM-Modellen aus Punktwolken wurden erprobt und es konnte gezeigt werden, dass eine Anwendung in der Praxis grundsätzlich möglich ist. Anfängliche technologische Herausforderungen konnten gelöst werden. Die Erkenntnisse und die entwickelten Prozesse haben das Potential, die bisherige Praxis in der Bauwerkserhaltung effizienter zu gestalten.

Ein besonderes Potential liegt in der vollständigen Digitalisierung der Bauwerksprüfung und Erhaltungsplanung. Mithilfe von BIM-Modellen können die Befunde genau lokalisiert und in einem Detaillierungsgrad quantifiziert werden, der bisher nicht möglich war. Eine fotorealistische Darstellung von Schäden und die Möglichkeit, weitere Prüfergebnisse wie Bodenradar oder Potentialfeldmessungen zu überlagern ermöglicht es, fundierte Entscheidungen zu Erhaltungsmaßnahmen zu treffen. Letztlich können im BIM-Modell alle Befunde, Bauwerksprüfungen und Änderungen über den gesamten Lebenszyklus fortgeschrieben und ausgewertet werden. Dies hilft nicht nur bei der Entscheidungsfindung am einzelnen Bauwerk, sondern auch dabei, wertvolle Informationen für die Erhaltung des gesamten Bestands zu liefern.

Eine weitere Verbesserung der entwickelten Methoden wäre insbesondere durch die Schaffung einer umfassenden Brücken- und Bauteildatenbank möglich. Eine umfassende Sammlung an Trainingsdaten und neuronale Netzwerke, die mit vielfältigen Erfassungsdaten antrainiert werden, würden die Automatisierung und Robustheit weiter steigern. Ein erweiterter Katalog von brückenspezifischen Regeln kann weiterhelfen, im Modell realistische Objekte als Stellvertreter für nicht sichtbare Bauteile zu generieren.

Summary

Development of procedures for the semi-automated construction of BIM models for existing road bridges

1 Task description

According to the document “Master Plan BIM Federal Highways (Masterplan BIM Bundesfernstraßen)” of the German Federal Ministry for Digital and Transport, since 2021 new construction projects have to be planned and built using digital building models. These digital building models are to be further used for operation and maintenance.

The benefit of the digitalization in operation and maintenance can only be fully exploited when BIM (Building Information Modeling) models are also available for the majority of the existing structures. Manual digitalization of 2D plans is time-consuming or only possible to a limited extent, depending on the readability and completeness of the plans. In addition, BIM models derived from 2D plans represent often the as-planned and not the as-is state of structures.

This project aims to develop procedures for the (semi-)automated provision of BIM models from 3D point clouds (the so-called Scan2BIM process) for existing road bridges, which can serve as the basis for a comprehensive digitalization campaign of the whole bridge inventory. The as-is state of the bridge geometry is derived from point clouds, which can be efficiently obtained using modern 3D surveying technologies. The potentials and limits of AI (Artificial Intelligence) methods for the segmentation of bridge elements are tested. In addition, geometric representations of bridge elements are derived from the segmented point cloud clusters and additionally enriched with data from SIB-Bauwerke (German road structures database). The practical applicability of the developed procedures is demonstrated within the project by providing an exemplary application for existing bridges on the German federal highway network.

2 Fundamentals and requirements analysis

The basic principles to understand the Scan2BIM process were researched and assessed within the project. These principles entail various aspects of surveying technology, data processing, algorithms and BIM models.

3D point clouds of bridge surveys, acquired with LiDAR (Light Detection and Ranging) systems and photogrammetry, were evaluated with respect to data quality. It was shown that LiDAR data in particular provides the necessary quality for further processing and interpretation using the methods of artificial intelligence. In general, AI methods for digitizing the built environment are becoming increasingly significant, as they can provide the necessary level of automation for the network-wide provision of BIM models. The use of Deep Learning (DL) methods, as a sub-field of AI, is particularly promising in this regard. After being trained using the provided learning data, bridge elements in the scanned 3D point clouds can be recognized with the help of AI, increasing the degree of automation of the Scan2BIM process.

The BIM model can represent a structure as a digital twin and provides a comprehensive list of various information about it. The feature for which the BIM methodology is best known is the visual 3D representation of individual structural elements, together with their properties. The accuracy of the structure representation in the BIM model can vary from purely conceptual to highly detailed and is defined by the Level Of

Detail (LOD). For this project, different LODs were chosen depending on the availability of the data from SIB-Bauwerke.

3D geometric representations suitable for BIM models can be derived from point clouds using various geometric reconstruction approaches. Surface reconstruction methods provide the generation of surface models, e.g., in the form of triangular meshes (Mesh). Cross-section detection methods and the corresponding extrusion generations enable the generation of solid models, e.g., in the form of boundary representations (BRep). These methods were evaluated in terms of their practicality and a selection of them was implemented in the prototype.

The relevant databases (“Bauwerksdatenbanken von Bund und Ländern - SIB-Bauwerke”) and geographical information systems (“Bundesinformationssystem Straße – BISStra”) were analyzed and selected information from them was included in the model generation process. Based on the analyzed ontology of SIB-Bauwerke database, a fine-grained subdivision of the bridge elements in the BIM model is required so that each element in the BIM model can be linked to the corresponding data from SIB-Bauwerke (e.g., type, materials, condition, measures, etc.). The road network data from BISStra was used to determine the direction of the axis carried by the structure and enumerate the elements in the BIM model along the axis.

3 Methodology, prototype and exemplary usage

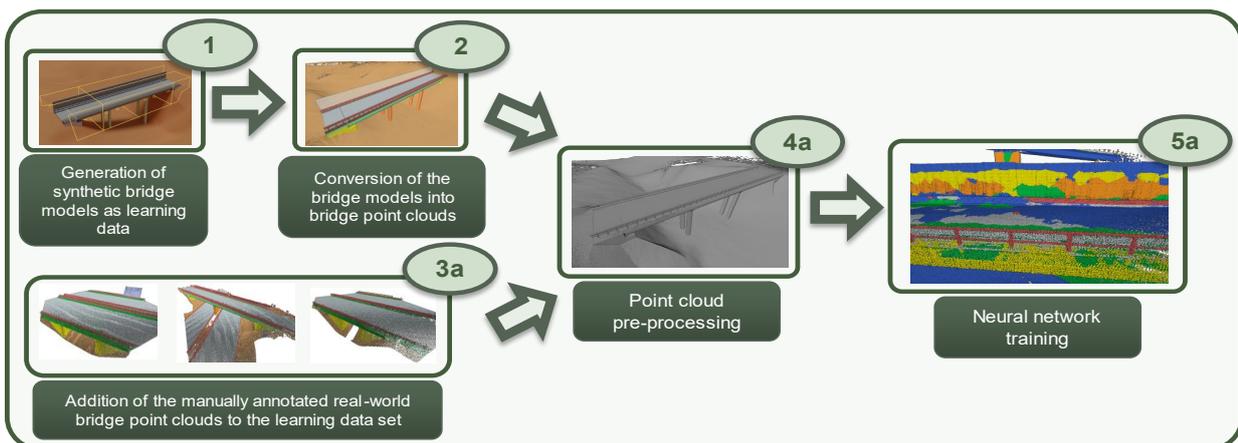


Figure 1 Developed procedures for the partially automated creation of BIM models from 3D point clouds for existing road bridges. First group: Training

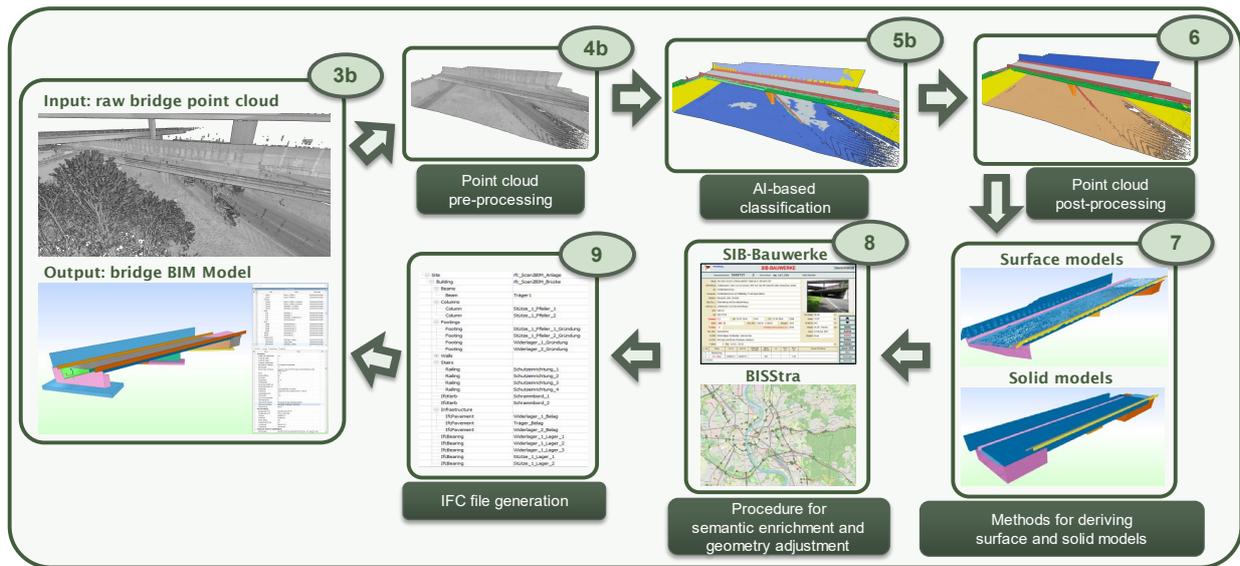


Figure 2 Developed procedures for the partially automated creation of BIM models from 3D point clouds for existing road bridges. Second group: Application

Procedures for the (semi-)automated creation of BIM models from 3D point clouds were designed, implemented and tested within this research project. The developed concepts are based on a combination of AI methods, geometric segmentation and heuristic algorithms for obtaining volume models and can be divided into a total of nine steps, depicted in Figure 1 and Figure 2.

Steps 1, 2, 3a, 4a and 5a (Figure 1) belong to the first group of developed procedures in the research project, namely to the training of neural networks. This also includes the preparation of a learning data set. Steps 3b, 4b, 5b, 6, 7, 8 and 9 (Figure 2) belong to the second group of developed procedures, namely the practical application of the Scan2BIM process. This involves the (semi-)automated creation of BIM models from point clouds. All nine steps of the established procedures are described in the following.

Step 1: Generation of bridge models as learning data.

Training data is essential for the application of AI methods. In this research project, 3D bridge models are used for the generation of the synthetic training data set. For this purpose, bridge models with the corresponding semantics for each bridge element are generated to represent a significant portion of the existing road bridges. The bridge models are created by combining typical bridge elements from the specially developed bridge element database. The bridge models in this training data set are structured in such a way that they can be easily linked to the data from SIB-Bauwerke. A bridge element from SIB-Bauwerke is represented by one or more elements in the bridge BIM model.

Step 2: Conversion of the bridge models into bridge point clouds.

The generated 3D bridge models are virtually scanned and converted into annotated point clouds to be used for neural network training. Virtual scanning is necessary to ensure that the characteristics of the training data match as close as possible those of real scans. LiDAR scans along virtual flight routes as well as terrestrial surveys are simulated in this step.

Step 3: Addition of the manually annotated real-world bridge point clouds to the learning data set.

In addition to the generated bridge models, further training data is created by annotating three real-world bridge point clouds (step 3a), to ensure high-quality classification of the real-world bridge point clouds. Each point is enriched with information about its corresponding bridge element.

For the classification (Figure 2), the raw real-world bridge point clouds enter directly the processing chain (step 3b). The processing sequence continues with step 4b.

Step 4: Point cloud pre-processing.

3D point clouds are characterized by their high memory requirements, unstructured raw data, and variations in resolution, density, and accuracy. Various pre-processing and filtering steps are implemented on the scan data to improve the data quality. In this way a minimum quality of data can be ensured, by removing outliers, duplicate points and moving objects. The training data of the synthetic point clouds go through only a few pre-processing steps (step 4a), while more sophisticated pre-processing steps are required for unprocessed real-world bridge scan (step 4b).

Step 5: Neural network training and AI-based classification.

The AI-based classification (step 5b) works with the pre-processed real-world bridge scan and determines the most probable class (bearing, carrier, etc.) for each point of the point cloud. The AI uses neural networks trained with the training data consisting of synthetic and real-world annotated point clouds (step 5a). The AI analyzes the point cloud point by point, examining its location and distribution of neighboring points. Thus, a probability of a point belonging to a specific bridge element can be determined and the entire point cloud can be segmented into point clusters belonging to different bridge element classes.

Step 6: Point cloud post-processing.

Post-processing of 3D point clouds is necessary because the AI-based classification can incorrectly classify individual points, especially in building element boundary regions. By applying different analysis methods (segmentation, voting, etc.), points and point groups are checked for their plausibility for the classes assigned by the AI and corrected if necessary. The point clouds with the building element class information are then used to derive the surface and volume models in the next process step.

Step 7: Methods for deriving surface and solid models.

Point clouds are not a suitable representation for further use in the BIM model, which is why the derivation of surface and volume models from the point clouds is necessary. The segmented point clusters are first converted into a specific form, to be used for the geometric reconstruction algorithms. This is done by clustering individual bridge elements for each bridge element class, separating twin bridge structures, aligning bridges to the bridge axis, further subdividing bridge elements, enumerating and naming point clusters based on the bridge axis direction. Afterward, various surface reconstruction methods are used to generate 3D surface geometries. While these 3D geometries represent the bridge element surface in good detail, they usually lack an element volume and are thus of limited use for further applications. Therefore, methods for the cross-section recognition and extrusion direction of the individual bridge elements were developed and used to generate 3D volume geometries. The result of this step is therefore a collection of the surface and volume models of the input bridge segmented point cloud.

Step 8: Procedure for semantic enrichment and geometry adjustment.

An additional procedure was developed to enrich the BIM model derived from the point clouds with information from SIB-Bauwerke, e.g., by enumerating the bridge elements based on the algorithmically determined bridge axis direction, attaching various properties (e.g., type, construction type, relationship, material) to elements, and adding missing dimensions (e.g., pavement thickness) or bridge elements (e.g., isolation layer and footings) that are not visible. The usual bridge properties and default values are defined in the form of an expert system, to eliminate the remaining faults in the geometric representations of the bridges and to be able to generate more realistic geometries. The result of this step is algorithmically improved geometries of the bridge elements and their merging into a single 3D bridge model.

Step 9: IFC file generation.

This is the last step in the entire processing sequence and takes over the geometric representations of the bridge elements generated in the previous step. The corresponding IFC hierarchy of IFC entities for the bridge elements is created and additional information is assigned to the IFC elements. Finally, all bridge elements are merged into a single bridge representation and the output of this step is the final product of the developed process sequence, a bridge BIM model in an open IFC format. Since step 7 provides as an output different geometric representations depending on the selected geometry reconstruction method, several variants of BIM models can be exported in IFC format.

The practical applicability of the developed methods is demonstrated by generating an actual BIM model for real bridges with the bridge elements segmented based on AI methods, enriched with semantic information from the SIB-Bauwerke database, and derived in the standardized and open IFC format. Within the modular process sequence (Figure 2), standardized input and output formats are used, so that a later extension, optimization or replacement of process components in the scope of further development is possible. A visualization of the generated BIM models of two real bridges of the German federal highway network is shown in Figure 3.

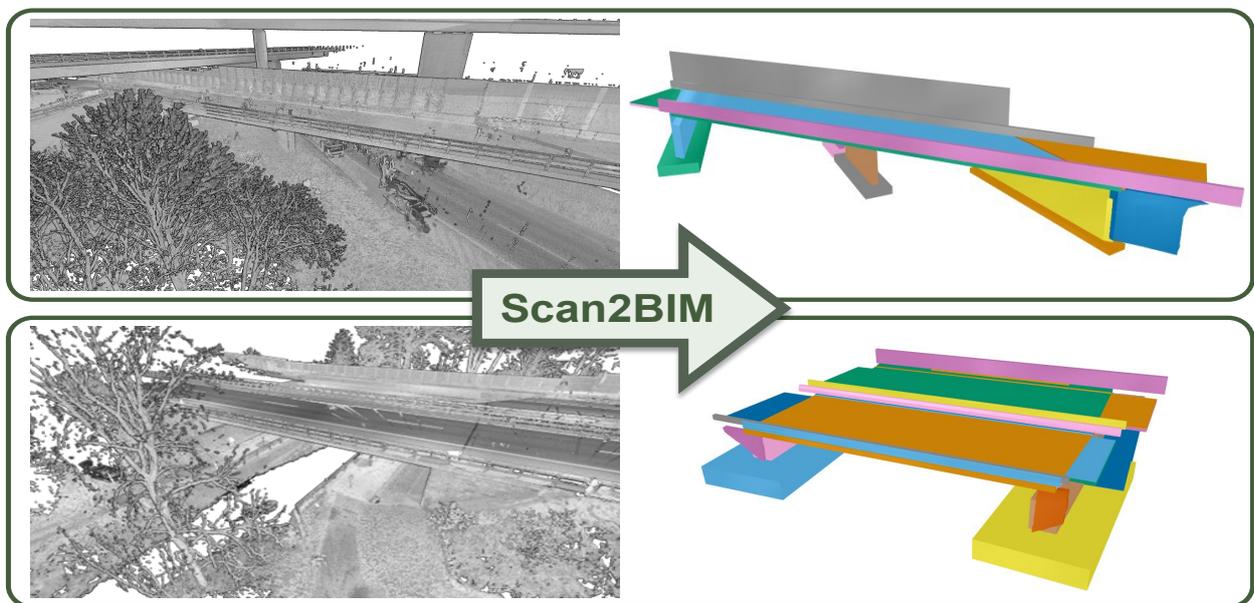


Figure 3 The derived BIM models from two real bridge point clouds

4 Implications for practice

In this research project, a novel modular approach for the (semi-)automated conversion of point clouds into BIM models was developed. The approach is based on a combination of artificial intelligence and heuristic algorithms. Neural networks were trained with synthetic as well as real data sets of typical building elements and tested on point clouds of actual buildings. The recognized components are transformed into a triangulated surface mesh and subsequently volume models are generated. The final result is an as-is BIM model of a bridge and its components, enriched with semantic information from SIB-Bauwerke and BISStra in the open IFC format.

The developed processes for deriving BIM models from point clouds were tested and it could be shown that an application in practice is possible. Initial technological challenges could be overcome. The findings

and the developed processes have the potential to make current practice in structural maintenance more efficient.

A significant potential lies in the complete digitalization of structural inspection and maintenance planning. With the help of BIM models, findings can be precisely localized and quantified in a level of detail that was previously not possible. A photorealistic representation of the damage and the ability to overlay other investigation results such as ground penetrating radar or potential field measurements makes it possible to make well-informed decisions about maintenance measures. Ultimately, all findings, structural inspections and modifications can be traced in the BIM model and processed over the entire life cycle of a structure. This helps not only in decision-making on the individual structure, but also in providing valuable information strategically for the management of the entire inventory.

Further improvement of the developed methods would be possible especially through the establishment of a comprehensive bridge and bridge element database. A comprehensive collection of training data and neural networks trained with diverse collected data would further increase automation and the robustness of results. An extended catalog of bridge-specific rules can further help to generate realistic objects in the model as proxies for non-visible components.