

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Künstliche Intelligenz zur automatischen Bestandsmodellierung von Tunnelbauwerken

November 2024





Projektpartner

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. Markus König (Projektleitung)

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes



Bundesanstalt für Straßenwesen – Deutschland

Ansprechpartner:
Marius Nono Tamo



BUNG Ingenieure AG

Ansprechpartner:
Karl Hanke



elevait GmbH & Co. KG

Ansprechpartner:
Laura Stern



LocLab Consulting GmbH

Ansprechpartner:
Sven-Eric Schapke

1 Einleitung

Ein zentrales Ziel des Forschungsprojekts DIDYMOS ist die Entwicklung von Verfahren zur automatischen Auswertung von Bestandsunterlagen zur Erzeugung digitaler Tunnelmodelle. Diese Tunnelmodelle dienen anschließend als Basis für einen digitalen Zwilling. Die auszuwertenden Bestandsunterlagen, etwa Prüfberichte, Schadensfotos und Bauwerkspläne, liegen oftmals nur in unstrukturierter Form vor. Das bedeutet, dass die für die Modellerstellung notwendigen Informationen nicht von konventionellen Software-Tools extrahiert und ausgewertet werden können. Daher wurde in DIDYMOS ein Prozess konzipiert, der auf Machine-Learning-Verfahren basiert und in der Lage ist, die Bestandsunterlagen automatisch auszuwerten und in das digitale Tunnelmodell zu überführen.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, gliedert sich die Aufgabe in drei Prozesse:

- **Bauliche Bestandsmodellierung** umfasst die Erfassung und Modellierung der Tunnelgeometrie. Hierbei werden Bestandspläne mithilfe von Computer-Vision-Verfahren (CV) ausgewertet. Als Ergebnis wird das geometrische Tunnelmodell erstellt.
- **Bauliche Zustandserfassung** beinhaltet die Erkennung, Klassifikation, Lokalisation und Erfassung vorliegender Bewertungen von Bauwerksschäden. Diese Informationen werden aus Prüfberichten und den dazugehörigen Schadenfotos mithilfe von CV und natürlicher Sprachverarbeitung (Natural Language Processing - NLP) extrahiert und in ein separates Fachmodell für Bauwerksschäden überführt.
- **Betriebliche Zustandserfassung** umfasst die Erstellung eines weiteren Fachmodells, das die betriebliche Tunnelausrüstung enthält. Dafür werden Punktwolken des Tunnels, Produktdatenblätter der Ausrüstungsgegenstände und Videos von

Tunneldurchfahrten mithilfe von CV und NLP-Verfahren ausgewertet.

Die Datenquellen und Verarbeitungsmethodiken für die Erstellung der jeweiligen Fachmodelle sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Durch das Übereinanderlegen der einzelnen Fachmodelle entsteht die Bestandsgrundlage für den Digitalen Zwilling.

2 Rekonstruktion der Tunnelgeometrie

Das grundlegende BIM-Fachmodell Tunnel (vgl. Abbildung 1) bildet die Geometrie des bestehenden Tunnels ab. Um die Geometrie zu rekonstruieren, können entweder Punktwolken oder Bauwerkspläne herangezogen werden. Punktwolken enthalten zwar detaillierte geometrische Informationen, sind jedoch nicht immer verfügbar und müssen aufwendig aufgenommen werden, was teilweise eine vollständige Sperrung des Tunnels erfordert. Außerdem erfassen Punktwolken nur Informationen über sichtbare Flächen, sodass wichtige Informationen, wie die Dicke der Tunnelschale, fehlen. Bauwerkspläne hingegen enthalten diese zusätzlichen Informationen und sind häufig bereits vorhanden. Daher werden sie als Grundlage gewählt und im Rahmen des Projekts automatisiert ausgewertet.

Für die Rekonstruktion der Tunnelgeometrie werden zwei geometrische Komponenten benötigt: die Bauwerksachse und der Tunnelquerschnitt. Zunächst wird mithilfe von CV-Verfahren die zentrale Bauwerksachse aus den Plänen als Polygon extrahiert. Anschließend werden Stationswerte durch OCR (Optical Character Recognition, also optische Zeichenerkennung) erkannt und der Achse zugeordnet. Das Resultat ist ein Achspolygon mit den zugehörigen Stationen wie in Abbildung 3 dargestellt.

Der Tunnelquerschnitt wird aus den Planquerschnitten gewonnen. Hierfür wird zunächst ein tiefes neuronales Netz zur semantischen Segmentie-

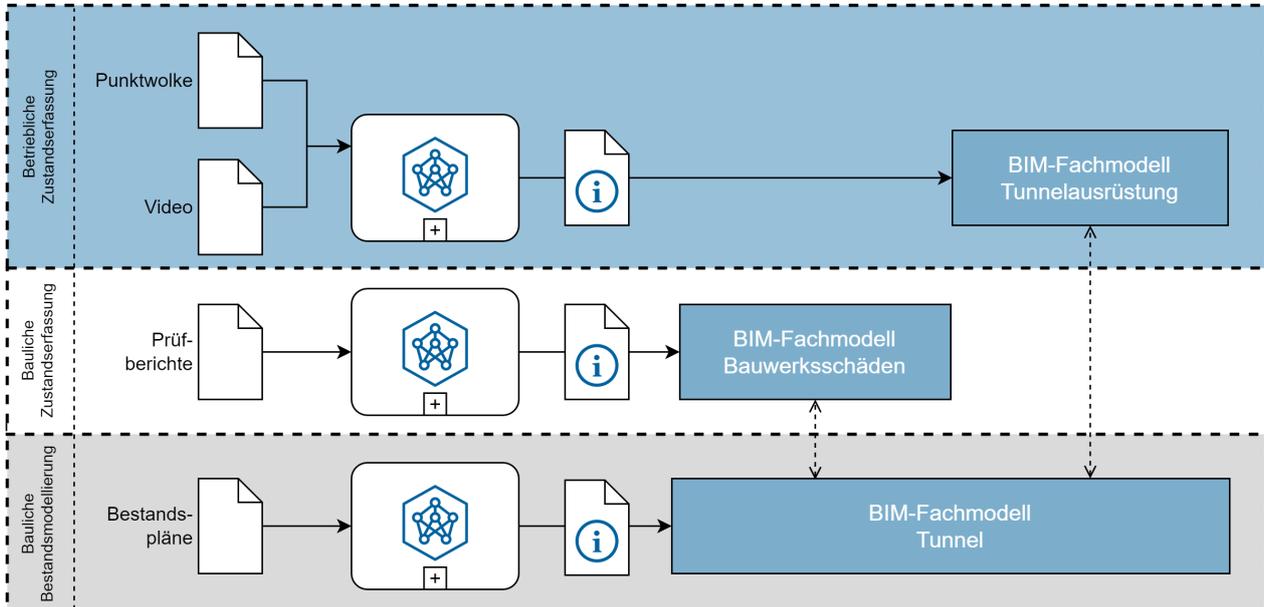


Abbildung 1: Prozess zur automatischen Bestandsmodellierung. Quelle: RUB

rung eingesetzt, beispielsweise U-Net, um die Pixel zu identifizieren, die zum Querschnitt gehören, wie in Abbildung 4 zu erkennen. Auf Basis dieser Pixelmaske können das äußere und das innere Polygon des Querschnitts ermittelt werden. Diese Polygone werden anschließend mithilfe von Optimierungsverfahren in eine parametrische Tunnelquerschnittsgeometrie überführt.

3 Bauliche Zustandserfassung

Im Rahmen von Bauwerksprüfungen wurden die Zustände von Bauwerken über Jahrzehnte hinweg dokumentiert. Die hierbei generierten Prüfberichte und Bilder müssen ausgewertet und die enthaltenen Informationen in Form eines Fachmodells gespeichert werden. Dieses Fachmodell kann dann mit dem digitalen Gesamtmodell des Tunnels kombiniert werden, um den baulichen Zustand der Struktur korrekt zu erfassen (vgl. Abbildung 1). Während sich Informationen wie die Art des Schadens direkt übertragen lassen, erfolgt die Lokalisierung des Schadens im Modell sowie für die Auswertung der Schadensbilder unter Zu-

hilfenahme von KI-Methoden, um ein möglichst präzises Modell zu erstellen.

Prüfberichte werden gemäß DIN 1067¹ bzw. RI-EBW-PRÜF² erstellt, welche die Dokumentation von Hauptbauteil und/oder Konstruktionsteil und/oder Bauteilergänzung eines aufgenommenen Schadens vorschreibt. Diese Information ist aufgrund der großen Länge der meisten Tunnel nicht ausreichend, um eine genaue Lokalisierung des Schadens im Bauwerk und damit im Modell vorzunehmen. Daher ist eine Auswertung des Freitextfeldes eines Schadens erforderlich, in dem häufig genauere Angaben zum Ort des Schadens angegeben sind, wie bspw. die Blocknummer im Tunnel. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird der Text mit NLP verarbeitet und ausgewertet, um eine genaue Lokalisierung der Schäden über die Blocknummern sowie der relativen Verortung im Block zu ermöglichen.

¹DIN 1076:1999-11, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung

²Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)

		Bild	Video	Punktwolke	Textdokumente	Objekterkennung	Instanz-segmentierung	Natural Language Processing
Rekonstruktion Geometrie	Achserkennung	✓				✓		
	Erkennung des Tunnelquerschnitts	✓					✓	
Bauliche Zustandserfassung	Schadenserkennung	✓					✓	
	Analyse von Prüfberichten				✓			✓
Betriebliche Zustandserfassung	Lüfter-Tracking		✓			✓	✓	
	Lüfter-Verortung			✓		✓		
	Extraktion von Lüfterproduktaten				✓			✓

Abbildung 2: Datenquellen und genutzte Methoden. Quelle: RUB

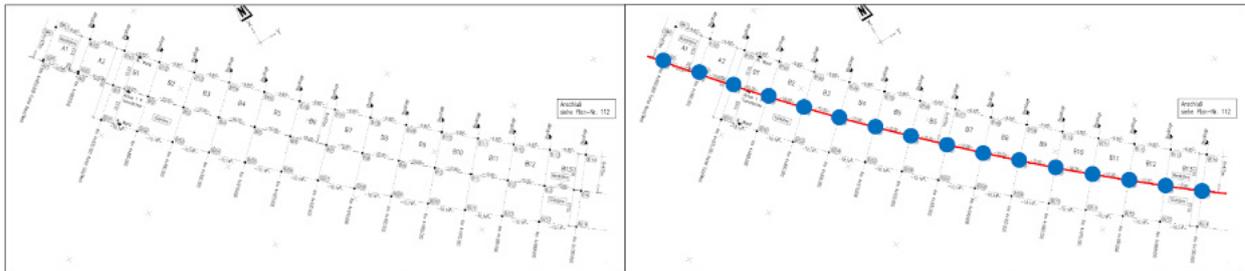


Abbildung 3: Tunnelachse (rot) und Blockabschnitts-Markierungen (blau) werden durch CV-Verfahren und OCR identifiziert. Quelle: elevait

Sowohl historische Aufnahmen aus vorangegangenen Prüfungen als auch neue aus aktuellen Prüfungen oder Durchfahrten, können genutzt werden, um eine Vielzahl von Schäden im Bauwerk zu erkennen und zusätzliche Informationen zur Verfügung zu stellen. Dazu werden ein oder mehrere Schäden in einem Bild mithilfe von CV detektiert, klassifiziert, und dann auf Pixelebene segmentiert, siehe Abbildung 2. Verwendet werde hierfür tiefe neuronale Netze wie beispielsweise U-Net oder FPN, welche sich für die Bildverarbeitung als führend erwiesen haben. Die resultierenden Segmentationsmasken (vgl. Abbildung 5) erleichtern die Quantifizierung sowie den zeitlichen

Vergleich von Schäden. Die Größe der verschiedenen Schäden ist schnell erkennbar, und die bunten Masken heben sich deutlich vom Hintergrund ab.

4 Betriebliche Zustandserfassung

Bei der Zustandserfassung der Betriebstechnik liegt der Fokus insbesondere auf den Lüftern im Tunnel, meist Strahlventilatoren. Auch aus diesem Prozess entsteht ein Fachmodell, dass die Position und Klassifizierung der Ventilatoren beinhaltet (siehe Abbildung 1 & Abbildung 2). Hierbei kommen drei unterschiedliche Datenquellen zum Einsatz: Durchfahrtvideos, eine 3D-Punktwolke und

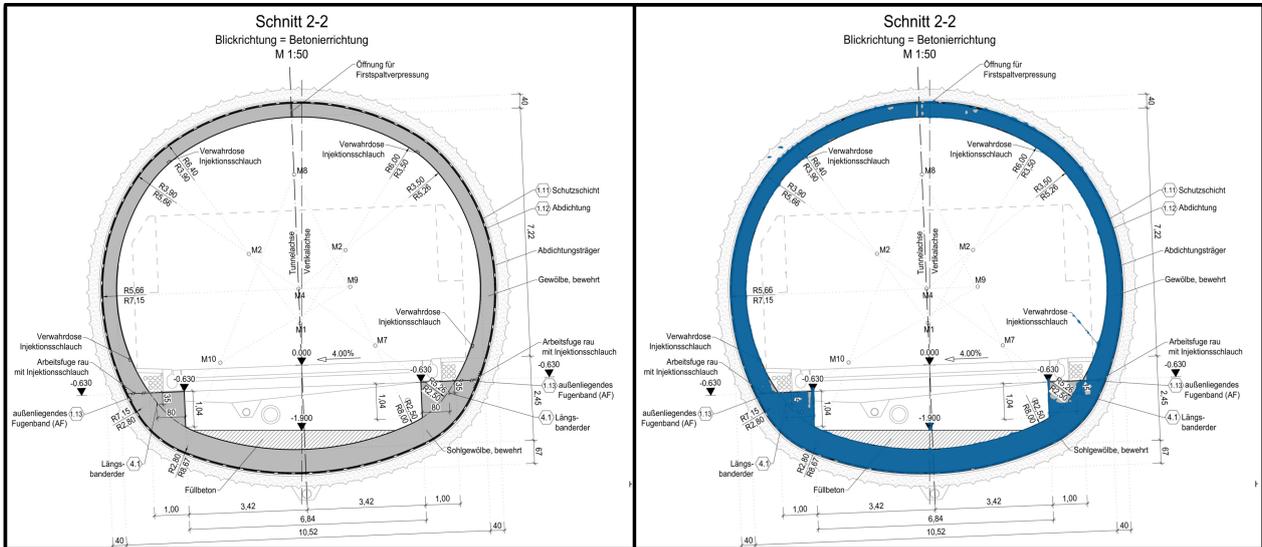


Abbildung 4: Beispiel eines Querschnitts der Tunnelgeometrie, links: original, rechts: zu extrahierende Geometrie-Maske. Quelle: RUB



Abbildung 5: Segmentationsmasken an einem Stahlbeton-Bauteil mit mehreren Schadstellen. Abplatzungen sind in rot dargestellt, Risse in grün, freiliegende Bewehrung in blau. Quelle: RUB



Abbildung 6: Beispielhaftes Ergebnis der Erkennung von Tunnelventilatoren in einem Durchfahrtsvideo. Quelle: RUB

die textlichen Produktdatenblätter der Lüfter. Die Erfassung und Zuordnung der Lüfter erfolgt in einem mehrstufigen Prozess, der eine präzise Bestandsdokumentation ermöglicht.

Zunächst wird mit dem 3D-Punktwolken-Scanner vom Typ Leica Pegasus TRK700 Evo während einer Tunneldurchfahrt ein umfangreicher Datensatz aufgezeichnet. Dieser umfasst sowohl eine 3D-Punktwolke als auch begleitende

RGB-Videos. Diese Daten dienen als Grundlage für die weitere Analyse. Im nächsten Schritt werden die Lüfterpositionen in den Durchfahrtsvideos mithilfe von KI-basierten Verfahren der Objekterkennung ermittelt, wie Abbildung 6 dargestellt. Hierfür kommt unter anderem das Objektdetektionsmodell YOLOv8 zum Einsatz, das speziell auf vergleichbare Durchfahrtsvideos – etwa von Dashcam-Aufnahmen – trainiert wurde. Das Modell erkennt die Lüfter in jedem Frame der Vide

odaten und kann verschiedene Lüfter voneinander unterscheiden.

Die aus den Videos ermittelten Lüfterpositionen werden anschließend auf die 3D-Punktwolke übertragen. Da die 3D-Punktwolke und das Durchfahrtsvideo aus derselben Perspektive aufgenommen wurden, lassen sich die im Video erkannten 2D-Lüfterpositionen auf die Punktwolke projizieren, wodurch eine 3D-Verortung der Lüfter ermöglicht wird. Dieser Schritt erlaubt es, die geometrischen Abmessungen und die exakte Position der Lüfter im Tunnel zu bestimmen.

Nach der Verortung erfolgt die Analyse der Lüftertypen. Hierfür wird entweder die 3D-Punktwolke mit einer Lüfterdatenbank abgeglichen oder die vorhandene Tunneldokumentation genutzt. Zusätzlich werden die relevanten Produktdatenblätter der identifizierten Lüfter herangezogen. Mithilfe von KI-basierten Verfahren zur Dokumenten- und Sprachverarbeitung werden wichtige Betriebsdaten aus diesen Textdokumenten extrahiert und den jeweiligen Lüfterobjekten zugewiesen.

Durch diesen umfassenden Analyseprozess liegt ein detailliertes Tunnelmodell vor, das nicht nur die Position, sondern auch den Typ der Lüfter enthält. Diese Lüfterobjekte können nun mit weiteren Messdaten, wie etwa Temperatur- und Strömungswerten, verknüpft werden, um eine ganzheitliche Bewertung des Betriebszustandes zu ermöglichen.

5 Fazit

Im Projekt DIDYMOS wurde ein Prozess zur Erstellung digitaler Tunnelmodelle von Bestandsbauwerken entwickelt, bei dem Bestandsunterlagen mithilfe von Machine-Learning-Verfahren ausgewertet werden. Die extrahierten Informationen müssen nun in den nachfolgenden Schritten miteinander verknüpft und in ein digitales Bestandsmodell zusammengeführt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes wird dazu ein parametrisches Tunnelmodell entwickelt, das basie-

rend auf den extrahierten Geometrieinformationen die Tunnelgeometrie rekonstruiert. Dieses grundlegende Modell wird anschließend um Teilmodelle für die baulichen und die betrieblichen Zustände ergänzt, wie in Abbildung 1 dargestellt. Das Gesamtmodell erfasst den aktuellen Ist-Zustand der Tunnelanlage und kann somit als Basis für einen digitalen Zwilling fungieren. Im weiteren Projektverlauf werden der schematische Aufbau des digitalen Zwillings sowie bestimmte Anwendungsfälle für diesen ausgearbeitet. So trägt DIDYMOS dazu bei, das digitale Betriebsmanagement entsprechend dem Masterplan BIM Bundesfernstraßen³ maßgeblich voranzutreiben.

Ansprechpartner KI-Themen

- Benedikt Faltin
benedikt.faltin@ruhr-uni-bochum.de
- Lisa Freiin von Rössing
lisa.freiinvonroessing@ruhr-uni-bochum.de
- Phillip Schönfelder
phillip.schoenfelder@ruhr-uni-bochum.de
- Prof. Dr.-Ing. Markus König
koenig@inf.bi.rub.de



³Masterplan BIM Bundesfernstraßen