

# Aufbau einer Datenbank für den Straßenraum und die Straßenzustandsbewertung mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI): Ein Multi-Partner Projekt

## Development of a Database for Road Infrastructure and Road Condition Assessment using Artificial Intelligence (AI): A Multi-Partner Project

Frank Knospe | Rico Richter

### Zusammenfassung

Die Bewirtschaftung und Erhaltung des deutschen Straßennetzes stellen Wirtschaft, Staat und Gesellschaft vor grundlegende Herausforderungen: Das Verkehrsaufkommen steigt trotz Mobilitätswende, Mittel für die Instandhaltung sind begrenzt und digitale Prozesse für die Erfassung, Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung fehlen. Es mangelt an flächendeckenden und stetig aktualisierten Daten zur Straßeninfrastruktur. Hierzu gehören nicht nur die Straße in ihrer Beschaffenheit an sich, sondern auch jeweilige Objekte im Straßenraum wie zum Beispiel Straßenmarkierungen, Verkehrsschilder, Bäume, Laternen etc.

Dieser Beitrag erläutert, wie Partner aus Industrie, Forschung, Verwaltung und Straßenunterhaltung datenorientierte Prozesse für den Aufbau digitaler Zwillinge des Straßenraumes entwickeln. 3D-Punktwolken, Bild- und Georadar-Daten werden mit Mobile-Mapping-Systemen erfasst und durch eine automatisierte Auswertung zum Aufbau einer Infrastrukturdatenbank für das Inventar im Straßenraum und die Zustandsbewertung von Straßen inklusive des Straßenuntergrundes genutzt. Ziel des Projektes ist es, mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz ein skalierendes System zu entwickeln, das unterschiedlichste Erfassungsdaten berücksichtigt und in den Gesamtprozess der Straßenunterhaltung und -erneuerung eingebunden werden kann.

**Schlüsselwörter:** Straßeninfrastrukturdatenbank, Straßenuntergrund, Mobile Mapping, automatisierte Auswertung, Künstliche Intelligenz, Laserscanning

### Summary

*The management and maintenance of the German road network pose fundamental challenges to the economy, the state and society: traffic volumes are increasing despite the mobility revolution, funds for maintenance are limited and digital processes for recording, condition assessment and maintenance planning are missing. There is a lack of comprehensive and constantly updated data on road infrastructure. This includes not only the road itself, but also objects in the road environment such as road markings, traffic signs, trees, street lamps, etc.*

*This article explains how partners from industry, research, municipal administration and road maintenance develop data-*

*oriented processes for setting up digital twins of the road infrastructure. 3D point clouds, image data and georadar data are collected with mobile mapping systems and are analyzed automatically to build up an infrastructure database for inventory in the road environment and the condition assessment of roads including the roadbed. The goal of the project is to use artificial intelligence to develop a scalable system that takes into account a variety of collected data. Furthermore, the system can be integrated into the overall process of road maintenance and renewal.*

**Keywords:** *road infrastructure database, roadbed, mobile mapping, automated analysis, artificial intelligence, laserscanning*

### 1 Einleitung

Das deutsche Straßennetz hat eine Länge von über 630.000 Kilometern. Die Bewirtschaftung und Erhaltung dieser Infrastruktur stellen Wirtschaft, Staat und Gesellschaft vor grundlegende Herausforderungen: Das Verkehrsaufkommen steigt trotz Mobilitätswende, Mittel für die Instandhaltung sind begrenzt und digitale Prozesse für die Erfassung, Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung fehlen. Ein grundlegendes Problem besteht in der fehlenden Verfügbarkeit flächendeckender und kontinuierlich aktualisierter Daten zur Straßeninfrastruktur. Neben der Straße an sich, gibt es andere Objekte wie Straßenbäume, Laternen, Verkehrsschilder, Markierungen und Sinkkästen.

Eine Datenerfassung mittels Mobile-Mapping-Systemen ist zwar etabliert und liefert 3D-Punktwolken, Bild- und Georadar-Daten (z. B. Panoramabilder) und Georadar-Daten (Knospe und Richter 2018). In der Praxis wird das Potenzial der erfassten Daten als datenorientierte Entscheidungsgrundlage jedoch nicht oder nur unzureichend genutzt. Informationen über den Straßenraum, den Straßenzustand sowie Veränderungen in der Substanz werden mit einem erheblichen zeitlichen Aufwand manuell erhoben, ausgewertet und gepflegt. Digitale 3D-Repräsentationen etablieren sich zunehmend in nahezu allen Geobereichen und bilden die Grundlage für sogenannte »räumliche digitale Zwillinge«. Sie werden durch eine Fusion von Daten aus unterschied-

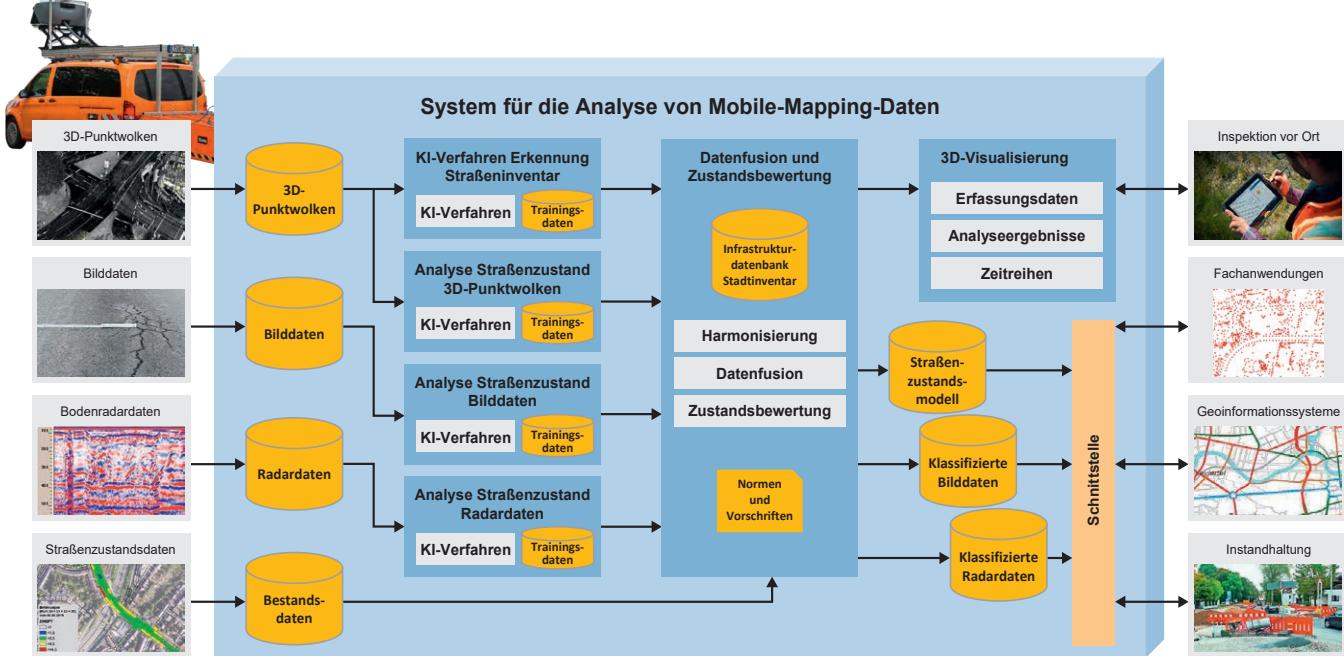


Abb. 1: Überblick über das System zur KI-basierten Analyse von Mobile-Mapping-Daten

lichen Sensor- und Trägertechniken gewonnen, sind durch ein riesiges Datenvolumen (mehrere Terabyte für ein Bundesland) gekennzeichnet und werden zukünftig in Quantität und Qualität enorm anwachsen.

Die Projektidee zum Aufbau digitaler Zwillinge des Straßenraumes entstand in Essen bereits 2017 mit der Beschaffung eines Multi-Sensor-Messfahrzeugs. Dabei wurden Skalierungsstufen der Digitalisierung der Straßenzustandsbewertung überlegt:

1. Baubegleitung und Dokumentation für Ausschreibungsunterlagen;
2. Flächendeckende Befahrung und Entwicklung einer Struktur für einen digitalen Workflow Straßenzustandsbewertung;
3. Einbindung Georadar in die Bewertung;
4. Portierung des Ansatzes und Automatisierung in einem SaaS und Cloud-Umfeld.

Die Punkte 1 und 2 wurden im Bereich Geoinformation der Stadt Essen in den letzten zwei Jahren umgesetzt, sodass eine umfangreiche Datengrundlage vorhanden ist. Mit dem Punkt 3 soll die flächendeckende Substanzmessung im Straßenuntergrund hinzugezogen werden. Für den Punkt 4 fehlen bisher die technologischen Bausteine und Verfahren zur automatisierten, algorithmischen Ableitung von Informationen über den Straßenraum. Damit aus Daten Wissen wird, müssen die Erfassungsdaten mit Semantik versehen werden, sodass z. B. die einzelnen Punkte der Punktwolke zu Objekten und Oberflächen zugeordnet werden können (Gebäude, Verkehrsschild, Lichtsignalanlage, Markierung usw.). Eine automatisierte, effiziente und zuverlässige KI-basierte Analyse und Interpretation kann umfassende Informationen zum Straßenraum liefern und eine enorme Wertschöpfung ermöglichen.

Die beiden wesentlichen Projektziele sind der Aufbau einer Infrastrukturdatenbank für das Straßenrauminventar und die Zustandsbewertung von Straßen inklusive

Schichtenaufbau. Durch die KI-gestützte Analyse von Mobile-Mapping-Daten sollen Infrastrukturdaten, wie Fahrbahnmarkierungen, Randsteine, Lichtsignalanlagen, Vegetation, Beschilderung, Einlaufschächte und Installationen, automatisiert erkannt werden. Der Straßenzustand soll durch die ganzheitliche Auswertung von Bild-, 3D-Punktwolken- und Georadardaten ermittelt werden sowie Lageinformationen und Straßenschäden enthalten (z. B. Schlaglöcher, Risse, Absenkungen, Spurrillen, Längs- und Querebenheit, Hohlräume). Im Verlauf des Projektes soll sichergestellt werden, dass das System skaliert, flächendeckend betrieben werden kann und ein wirtschaftlicher Gesamtprozess möglich ist. Das Projekt wird durch mehrere Partner realisiert: die Point Cloud Technology GmbH, die Stadt Essen, das Hasso-Plattner-Institut und der Landesbetrieb Straßen NRW. Das Konsortium umfasst somit Partner aus der Wirtschaft, dem öffentlichen Bereich sowie aus Wissenschaft und Praxis.

Die Forschungsfragen des Projektes sind wie folgt:

1. Wie können die großen Datenmengen (aktuell ca. 40 Gigabyte pro Kilometer) gehandhabt und analysiert werden?
2. Inwieweit kann die Straßenzustandsbewertung von Straßenoberflächen und -aufbau automatisiert werden?
3. Was sind die Möglichkeiten (und Grenzen) der Straßenbewertung anhand von Georadardaten?
4. Welche Zuverlässigkeit liefern KI-Verfahren für die Detektion des Straßenrauminventars?
5. Können Vernetzungspotenziale aus Verkehrszählungen einen Beitrag zur Abnutzung von Straßen liefern (z. B. Modell, Online, Mobilitäts-Daten-Marktplatz)?
6. Inwieweit lässt sich das Bewertungsmodell des Straßenzustandes kommunaler Straßen auf außerörtliche Straßen (Landstraßen, Bundesstraßen) erweitern?

In Abb. 1 wird ein Überblick über das geplante Gesamtsystem gegeben. Dieses System bündelt die Komponenten

für die KI-basierte Analyse der erfassten Mobile-Mapping-Daten und kann durch die Cloud-basierte Bereitstellung für große Datenmengen skalieren. So wird die Einstiegs-hürde für potenzielle Nutzer, wie Kommunen, Infrastrukturbetreiber, Erfassungsdienstleister und Bauausführende, gesenkt. Für die jeweiligen Systemkomponenten existieren bereits erste Ansätze bei den Partnern. Diese sollen im Vorhaben weiterentwickelt werden, um die Qualität, Skalierbarkeit und Interoperabilität sicherzustellen. Die bereits erfassten Daten von ganzen Stadtgebieten dienen als Datengrundlage, um das Gesamtsystem schon während der Entwicklung zu erproben und bis zum Projektende in zwei Jahren eine praxistaugliche Lösung bereitzustellen zu können.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die flächendeckende Befahrung des Stadtgebietes wurde durch den Bereich Vermessung der Stadt Essen durchgeführt, um eine Datengrundlage für die Entwicklung von digitalen Workflows zur Straßenzustandsbewertung zu schaffen. In ersten Prototypen wurden die Normen der »Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen« (ZTV ZEB-StB) und »Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen« (EMI) umgesetzt und in die tägliche Anwendung gebracht. Parallel dazu wurden auf Seiten des Hasso-Plattner-Instituts im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte regelbasierte Verfahren für 3D-Daten erforscht, die massive Datenmengen verteilt und performant auswerten können. Der Fokus lag hierbei insbesondere auf Punktfolgen aus Befliegungen, die anders als Erfassungen aus dem Mobile Mapping gleichmäßig verteilt sind, wenig Verschattung aufweisen und über zusätzliche Eigenschaften, wie z. B. Infrarotwerte, verfügen. Eine Übertragung der Verfahren auf Punktfolgen aus Mobile-Mapping-Erfassungen ist möglich, allerdings mit verschiedenen Hürden verbunden. So ist eine der größten Schwierigkeiten die Einbeziehung der verschiedenen Datenquellen (Georadar und 360°-Kamera), die sowohl unabhängig voneinander als auch kombiniert bewertet werden können, um so noch genauere Ergebnisse zu erhalten. Die Entwicklung einer skalierbaren Web-basierten Lösung für die Visualisierung und KI-gestützte Analyse ist eine weitere Herausforderung, die von der Point Cloud Technology adressiert wird.

Die meisten existierenden Arbeiten im Bereich der Erfassung von Straßeninfrastruktur arbeiten hauptsächlich auf Basis von Algorithmen, wobei Analysen entweder auf spezielle Objekte fokussiert sind und diese zumeist äußerst präzise erkennen (Weinmann et al. 2017) oder auf Kosten der Qualität generischer vorgehen und eine Vielzahl von Objekten gleichzeitig klassifizieren (Douillard et al. 2014). In den letzten Jahren entstanden vermehrt Arbeiten, welche Objekterkennungen mit Hilfe von Machine Learning durchführen (Maturana und Scherer 2015, Qi et al. 2017),

wodurch sich eine hohe Generizität mit einer hohen Genauigkeit verbinden lässt. Allerdings entstehen hierdurch wieder neue Herausforderungen, insbesondere im Bereich der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse oder der Anwendbarkeit auf real-weltliche Szenarien, wie beispielsweise der Straßenzustandserkennung. Hier wird bisher kaum mit KI-gestützten Verfahren gearbeitet, sondern häufig eine Sensorfusion aus Kamerabild und Punktfolge eingesetzt, um z. B. Schlaglöcher zu erkennen (Wu et al. 2019) oder Kenngrößen wie Längs- und Querneigung zu berechnen (Gezero und Antunes 2019). Eine Ergänzung dieser bestehenden Fusion um Georadar-Daten wurde bisher noch nicht untersucht. Isoliert betrachtet gibt es allerdings einige Arbeiten, die sich mit der Analyse von Georadar-Daten beschäftigen, beispielsweise, um mit regelbasierten Verfahren den Straßenzustand zu erfassen (Benedetto et al. 2017), Interpretationen von Oberflächenschäden zu ermöglichen (Gogolin und Hülsböhmer 2022) oder die Veränderung von Schäden über die Zeit zu überwachen (Saarenketo und Scullion 2000). Bislang gibt es jedoch keine Regelwerke, die sich in einer Straßenzustandsbewertung niederschlagen. Derzeit existiert keine zentrale Datenbank mit Bohrkernen aus der Straßenunterhaltung, sodass die Fusion zwischen der Horizontierung, den physikalischen und chemischen Materialeigenschaften sowie dem Radarbild manuell geschieht.

## 3 Daten und methodischer Ansatz

### 3.1 Datenquellen

Datenquellen sind mit Mobile-Mapping-Fahrzeugen (Abb. 2) erfasste Daten des Straßenraumes. Räumlich umfassen sie die Orts-, Landes- und Bundesstraßen der Stadt Essen und des Bundeslandes NRW. Konkret handelt es sich bei den Datenquellen um 360°-Panoramen (Ladybug Kamera), Laserscan (MX8/9) sowie Georadar-Horn-antennen (z. B. in Essen GSSI, bis 80 km/h; vier Antennen (2 × 2 MHz und 2 × 1 MHz) für den Straßenuntergrund bis 1 m Tiefe). Die Straßen werden seit 2018 einmal jährlich bzw. für Straßensanierungsvorhaben befahren.



Abb. 2: Mobiles Multi-Sensor-Messfahrzeug der Stadt Essen

Hierbei werden je Kilometer Fahrstrecke Datenmengen von ca. 40 Gigabyte generiert. Die Stadt Essen hat ein Straßennetz mit einer Länge von 1500 km und ca. 4000 km Fahrspuren, sodass jährlich ca. 160 Terabyte Daten für das Stadtgebiet von Essen entstehen. Daten kommen aber auch von anderen öffentlichen Datenquellen wie z. B. aus Begehungen, Verkehrssicherungsüberwachungen, Verkehrszählungen, historischen Datenerfassungen zur Straßenzustandsbewertung sowie dem Mobilitäts-Daten-Marktplatz (MDM).

### 3.2 Datenverarbeitung

Zur Verarbeitung der Daten werden Technologien aus den Bereichen Geoanalytik, KI, Big Data und SaaS miteinander kombiniert. Die erfassten Bilddaten werden nach den Geboten des Datenschutzes nach der Befahrung verpixelt (z. B. Nummernschilder, Gesichter). Die Verarbeitung und Speicherung erfolgen in einer Cloud-Infrastruktur. Neben Bilddaten, Punktwolken sowie Radargrammen von Straßen entsteht – durch die mit Analysen erzeugten Infrastruktur- und Zustandsbewertungsdaten – ein digitaler Zwilling mit semantischer Beschreibung der Eigenschaften. Konkret sind dies die Dateninhalte ZTV ZEB-StB sowie die EMI-konforme Bewertung von Straßen (z. B. Meterquadrate, Längs- und Querneigung, 20-Meter-Abschnitte je Fahrstreifen auf Basis eines Verkehrsnetzes) mit Hilfe (geo-)statistischer und KI-basierter Methoden. Ergänzt wird dies um eine Bewertung des Straßenaufbaus mittels Georadars bis zu einer Tiefe von 1 m. Die Daten und Ergebnisse werden in einem Cloud-basierten 3D-Viewer zur Verfügung gestellt. Eine Veränderungsanalyse zwischen Befahrungen wird zur Aktualisierung (Historisierung) und zur Prognose von Veränderungsgeschwindigkeiten der »Substanz«, aber auch für das Unterhaltungsmanagement vor Ort genutzt. Die Datenverarbeitungsmethoden sind bisher auf eine PC- und Server-Infrastruktur mit z. T. proprietärer Software und bislang nicht auf eine Skalierung ausgelegt. Die technische Herausforderung besteht in einer Portie-

rung der Methoden in eine SaaS- und Cloud-Umgebung (Kaufels 2020). Zur Skalierung müssen dabei vor allem Laufzeitoptimierungen vorgenommen und Parallelisierungskonzepte durch Softwareservices umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang werden auch die Fragestellungen der Verpixelung von personenbezogenen (-beziehbaren) Daten beachtet.

### 3.3 Analyse

Die geplanten Lösungsansätze für das Vorgehen müssen insbesondere die Skalierbarkeit, Automatisierung, Reproduzierbarkeit, Interoperabilität und angemessene Verarbeitungskosten sicherstellen, sodass die Grundvoraussetzungen für eine flächendeckende Nutzung erfüllt werden.

Der Lösungsansatz des Projektvorhabens ist deshalb stark datenorientiert, wird 3D-Informationen als Datengrundlage und Bezugssystem nutzen sowie die KI-Verfahren-Entwicklung als Prototyping umsetzen, um möglichst viele Ansätze zu erproben, aus denen dann die vielversprechendsten anhand der Evaluierungsparameter ausgewählt und in das Gesamtsystem integriert werden.

Alle im Vorhaben entwickelten Komponenten werden als Services (SaaS) mit definierten Schnittstellen implementiert, sodass eine horizontale Skalierbarkeit in einer Cloud-Umgebung möglich wird. Die Verwendung von standardisierten Datenformaten für den Austausch stellt die Interoperabilität und Integration in Bestandssysteme sicher.

Neben der Standardisierung der Datenformate ist die Lage-Transformation der Ergebnisse aus unterschiedlichen Sensoren eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Anhand eines Messfeldes sind erste Ansätze auch für komplexe Ausgleichsberechnungen geschaffen worden (siehe Abb. 3).

Die KI-basierten Verfahren für die Analyse wurden gewählt, um die Automatisierung zu gewährleisten, wie es bei dem zu erwartenden Datenaufkommen erforderlich sein wird. Bei der Entwicklung von KI-Verfahren müssen Algo-

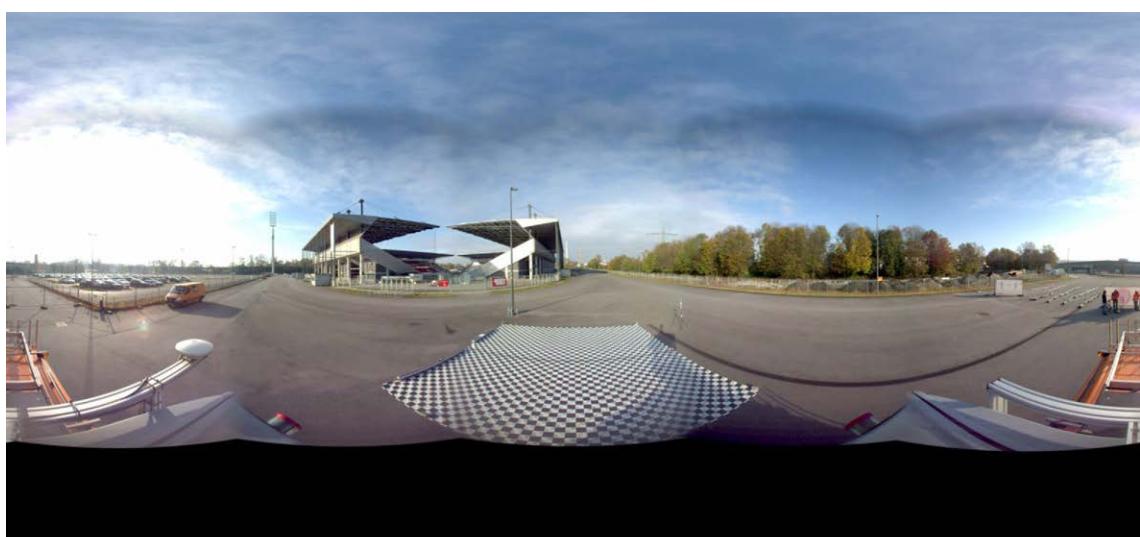


Abb. 3:  
Messfeld für  
die Sensor-  
fusion  
zwischen  
Laserscan und  
360°-Panora-  
men

rithmen anhand von Trainingsdaten trainiert werden. Für die KI-basierten Verfahren werden Wissensdatenbanken und Evaluierungsdatensätze aufgebaut. Diese sollen sicherstellen, dass die Qualität der Ergebnisse bei unterschiedlichen Eingangsdaten oder auch veränderten neuronalen Netzen bewertet und mit anderen Ansätzen verglichen werden kann (Reproduzierbarkeit).

## 4 Resümee und Ausblick

Schwerpunkt der Nutzung eines Multi-Sensorik-Messfahrzeugs mit einer SaaS-basierten Anwendungsumgebung führt im Dreiklang »Umfassende Grundlagen des Straßenaufbaus, -zustands für Ausschreibungsunterlagen und der Infrastruktur Straße«, »Abnahme von Baumaßnahmen (BIM: AsBuilt-Prüfung)« und »Prüfen möglicher Gewährleistungsansprüche (Change Management im Neubau und bei Sanierungen)« zu einer Kosteneffizienz der Straßenunterhaltung und -erneuerung. Im Ergebnis der Anwendungsfälle liegt eine umfassende Basis für Grundsatzbeurteilungen, Kostenprognosen zur Unterhaltung sowie Sanierung der Straßeninfrastruktur vor.

Mit der Digitalisierung der Straßenzustandsbewertung (inkl. Straßenuntergrund) und -infrastrukturkataster entsteht die Möglichkeit einer vorausschauenden Unterhaltung der Infrastruktur. Neben dieser neuen Möglichkeit eines dynamischen Unterhaltungsmanagements (und der damit verbundenen Mittelbewirtschaftung) sind insbesondere im Bereich der grundhaften Straßenerneuerung signifikante wirtschaftliche Effekte zu erzielen. Aus der Kombination von Georadarauflösung in Verbindung mit einer Materialansprache aus Bohrkernsondierungen lässt sich der Untergrund in Mengengerüsten beschreiben. Die Klassifizierung in wiederverwertbare und zu deponierende Materialien ist eine verbindliche Basis im Ausschreibungsprozess. Die Position »Unvorhergesehenes« im laufenden Baugeschäft wird dadurch erheblich reduziert. Neben den betriebswirtschaftlich positiven Effekten (Minimieren von Nachträgen) sind aber auch volkswirtschaftliche Effekte durch »verlässliche« Bauzeiten ohne Umplanung durch neue Erkenntnisse zu erzielen.

Das Projekt schafft durch zwei Dimensionen einen gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Einfluss. Zum einen wird der Ressourceneinsatz der öffentlichen Hand durch die Optimierung von Instandhaltung signifikant verringert. Straßeninfrastrukturbetreiber können Einsparungen erreichen, die für andere wichtige Investitionen zur Verfügung stehen. Der verringerte Ressourceneinsatz hat auch eine positive Auswirkung auf die ökologische Bilanz, da der Tiefbau der Material-intensivsten Teil der Infrastruktur Straße ist. Zum anderen wird der Verkehrsfluss durch die vorausschauende Wartung verbessert. Dies minimiert Verkehrsstaus und resultiert in einer CO<sub>2</sub>-Reduktion.

Eine gut geplante und vorausschauende Straßenzustandsbewertung unterstützt die Optimierung des Baustel-

lenmanagements und ermöglicht dadurch einen besseren Verkehrsfluss, erhöhte Verkehrsmobilität und größere Verkehrssicherheit auch im Hinblick auf Unfallvermeidung. Dies hat eine positive Auswirkung auf alle Verkehrsteilnehmer (Autos, LKWs, Transportverkehr, Fahrradfahrer, Fußgänger).

## Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), Deutschland (TWIN4ROAD, 19F2210) unterstützt.

## Literatur

- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L.B., D'amicco, F. (2017): An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Processing*, 132, 201–209. DOI: 10.1016/j.sigpro.2016.05.016.
- Douillard, B., Underwood, J., Vlaskine, V., Quadros, A., Singh, S. (2014): A pipeline for the segmentation and classification of 3D point clouds. In: *Experimental Robotics*, 585–600. Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-28572-1\_40.
- Gezero, L., Antunes, C. (2019): Road Rutting Measurement Using Mobile LiDAR Systems Point Cloud. 8(9), 404. DOI: 10.3390/ijgi8090404.
- Gogolin, D., Hülsböhmer, M. (2022): Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens bei Asphalt. *Straße und Autobahn*, 2, 94–103.
- Kaufels, P. (2020): Automatisierte Analyse und Zustandsbewertung kommunaler Straßen am Beispiel der Stadt Essen. Masterarbeit Hochschule Bochum.
- Knospe, F., Richter, R. (2018): Erfassung, Analyse und Auswertung mobiler Multisensoren im Straßenraum: Ein Erfahrungsbericht. In: DVW e.V. (Hrsg.): *MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund*. DVW-Schriftenreihe, Band 92, Augsburg, 91–97. <https://geodaeis.info/sr/mst-2018-multisensortechnologie-low-cost-sensoren-im-verbund/7659/1951>.
- Maturana, D., Scherer, S. (2015). Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 922–928. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353481.
- Qi, C.R., Su, H., Mo, K., Guibas, L.J. (2017): Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 652–660. DOI: 10.48550/arXiv.1612.00593.
- Saarenketo, T., Scullion, T. (2000): Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2-4), 119–138. DOI: 10.1016/S0926-9851(99)00052-X.
- Weinmann, M., Weinmann, M., Mallet, C., Bredif, M. (2017): A classification-segmentation framework for the detection of individual trees in dense MMS point cloud data acquired in urban areas. *Remote Sensing*, 9(3), 277. DOI: 10.3390/rs9030277.
- Wu, H., Yao, L., Xu, Z., Li, Y., Ao, X., Chen, Q., Meng, B. (2019). Road pothole extraction and safety evaluation by integration of point cloud and images derived from mobile mapping sensors. *Advanced Engineering Informatics*, 42, 100936. DOI: 10.1016/j.aei.2019.100936.

## Kontakt

Dr. Frank Knospe  
Leiter Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster Stadt Essen  
frank.knospe@amt62.essen.de

Dr. Rico Richter  
Geschäftsführer Point Cloud Technology GmbH  
rico.richter@pointcloudtechnology.com

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaeis.info](http://www.geodaeis.info).