



Digitale Zwillinge der bebauten Umwelt – Werkstattbericht aus dem DFG SFB/TRR 339

Jörg Blankenbach

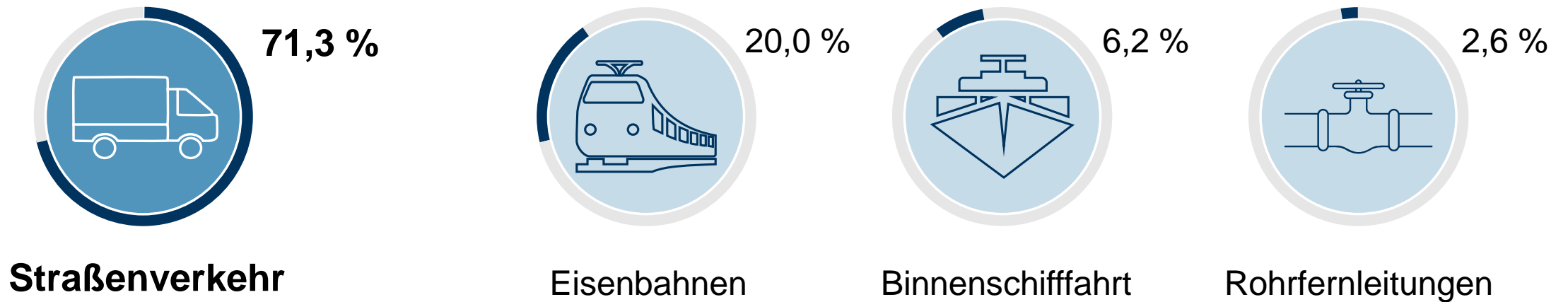
Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
RWTH Aachen University

Vermessungswesen aktuell 2025
13. November 2025 | Essen

Motivation – Ausgangssituation

Güterverkehr nach Verkehrsmitteln

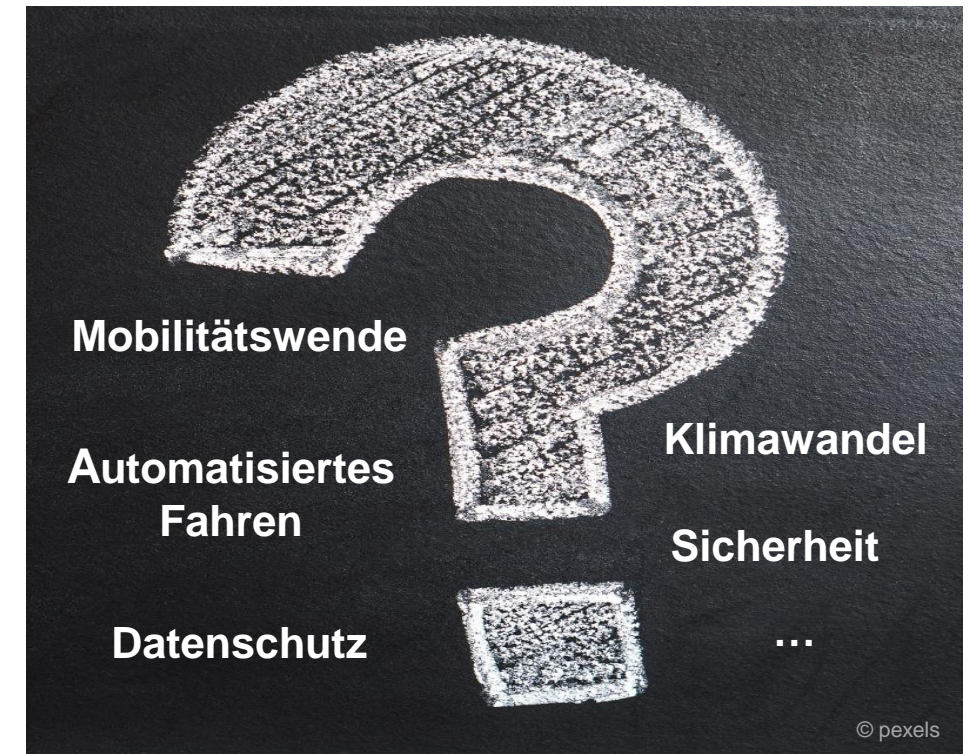
Verkehrsleistung (tkm) Binnenland



(Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Verkehr in Zahlen 2024/2025)

Motivation – Ausgangssituation

Straßeninfrastruktur heute



Zukünftige Herausforderungen

Agenda

- Was ist ein Digitaler Zwilling?
- SFB/TRR 339 „Digitaler Zwilling Straße“
- Geodätische Aspekte im SFB/TRR 339
- Showcase „Digitaler Schatten“
- Fazit

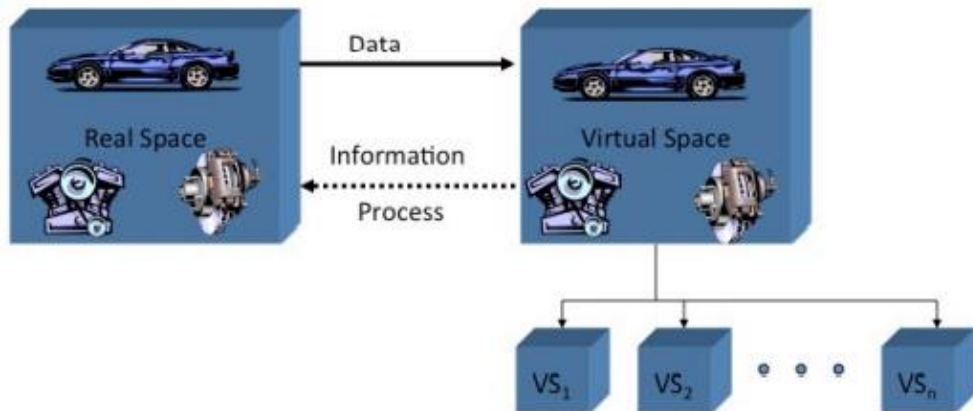


Was ist ein Digitaler Zwilling?

Was ist ein Digitaler Zwilling?

Definition – der Ursprung

Conceptual Ideal for PLM



(Grieves, M., University of Michigan, Dec 3, 2001)

(PLM = Product Lifecycle Management)

*“The Digital Twin concept model [...] It contains three main parts: a) **physical products in Real Space**, b) **virtual products in Virtual Space**, and c) the **connections** of data and information that ties the virtual and real products together.”*

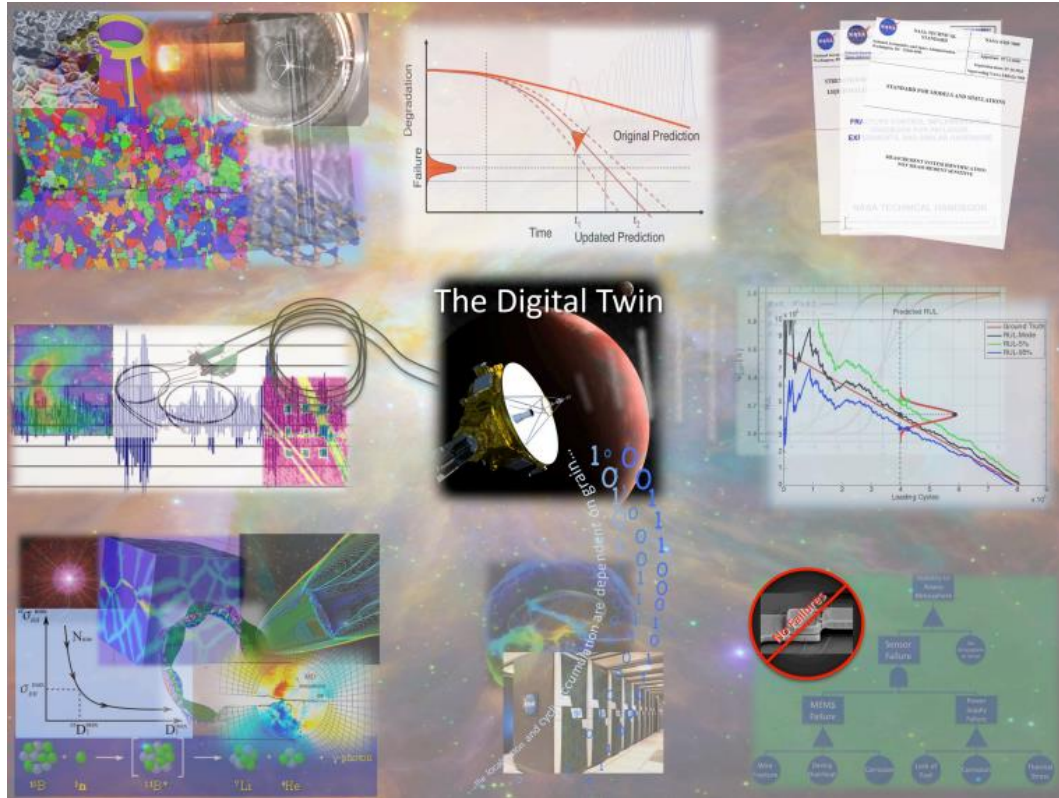
(Grieves, M., 2014)

(Quellen:

- Grieves, M. (2014): *Digital Twin – Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (Whitepaper)*. LLC, 2014
- Grieves, M.; Vickers, J. (2016): *Digital Twin – Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, 2016, DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609)

Was ist ein Digitaler Zwilling?

Definition – NASA / U.S. Air Force

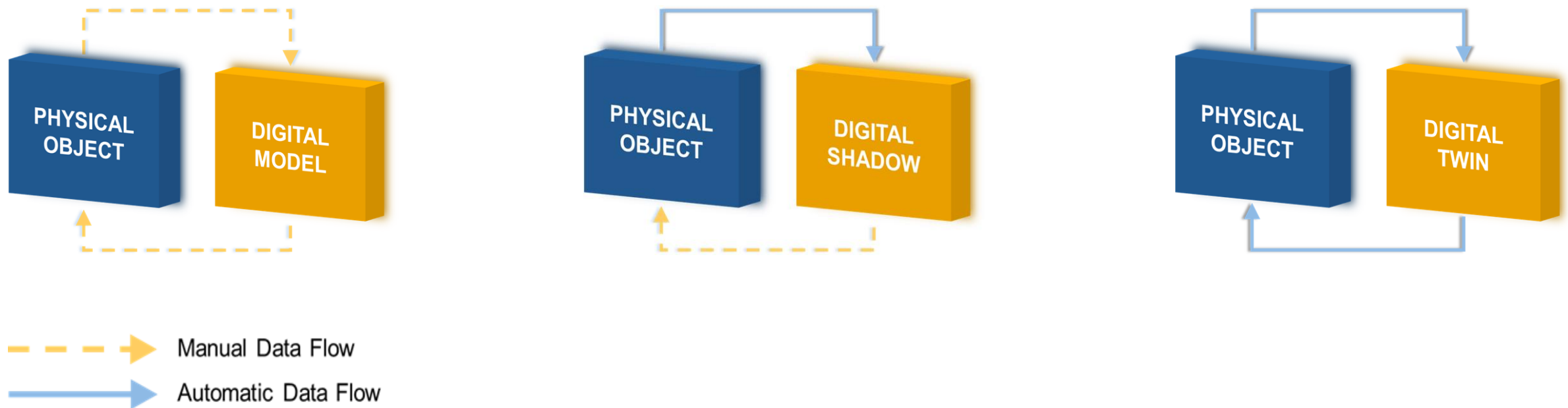


“A Digital Twin is an **integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle** or system that uses the best available **physical models, sensor updates, fleet history**, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems, including airframe, propulsion and energy storage, life support, avionics, thermal protection, etc. [...]”

(Quelle: Glaessgen, E.; Stargel, D. (2012): The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Honolulu, Hawaii, 2012, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>)

Was ist ein Digitaler Zwilling?

Reifegrade – Vom Modell über den Schatten zum Zwilling



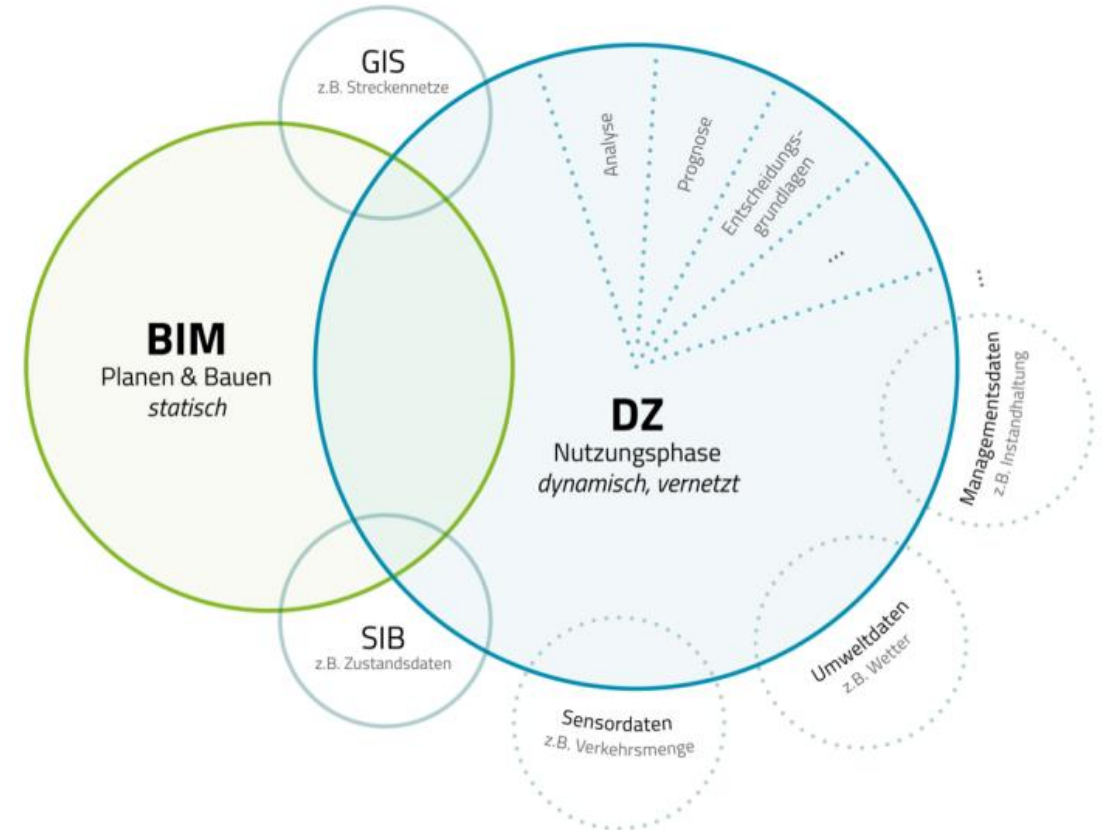
(Quelle: in Anlehnung an: Tchana et al. (2019): Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management, Procedia CIRP, vol. 84, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>)

Was ist ein Digitaler Zwilling?

Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen

„Ein Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen ist eine **virtuelle dynamische Repräsentation** des realen Systems und seiner Wirkzusammenhänge. Es unterstützt über einen (teil-)automatisierten **bidirektionalen Daten- und Informationsaustausch** optimierte Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Management im Lebenszyklus der Infrastruktur.“

(Quelle: Definitionspapier „Definition und Konzeption des Digitalen Zwillings Bundesfernstraßen“, ehemals BMDV)



SFB/TRR 339 „Digitaler Zwilling Straße“

Physikalisch-informatorische Abbildung des Systems „Straße der Zukunft“

Digitaler Zwilling Straße

www.sfbtrr339.de
visit us!

20
Teilprojekte

14
Institute

seit
01.01.2022



TU Dresden

Sprecher

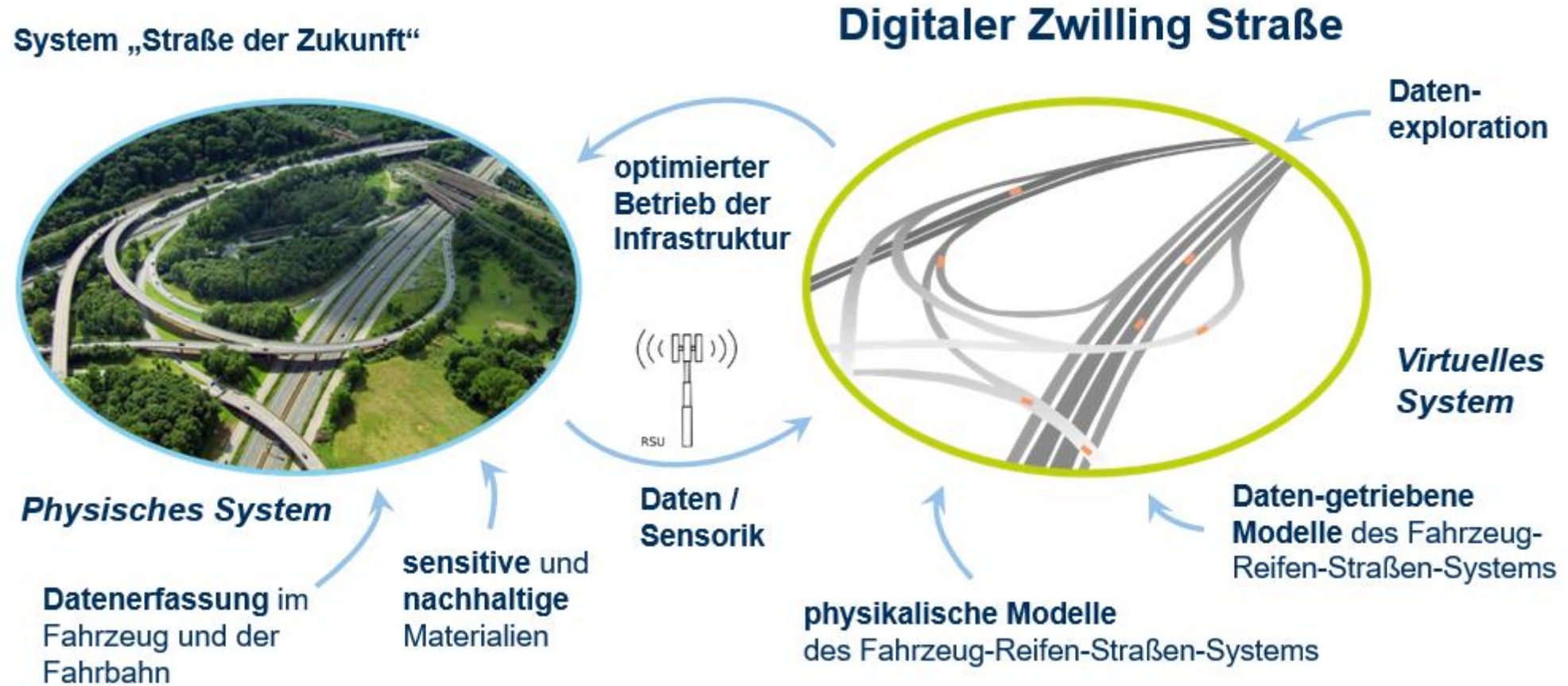
Michael Kaliske
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.

RWTH Aachen

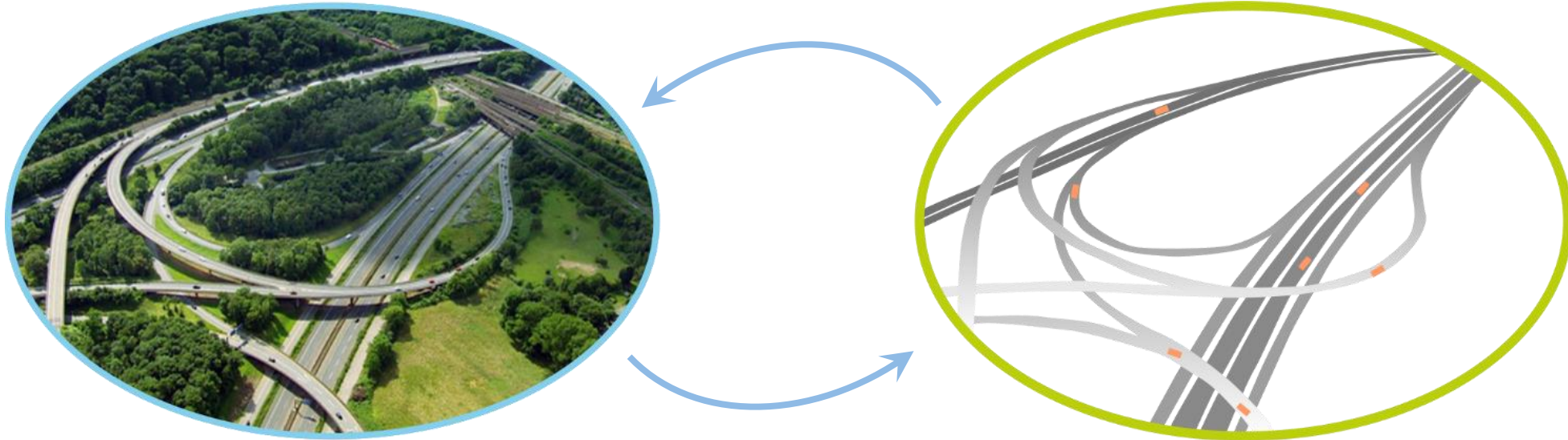
Stellvertretende Sprecher

Markus Oeser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Jörg Blankenbach
Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Grundidee



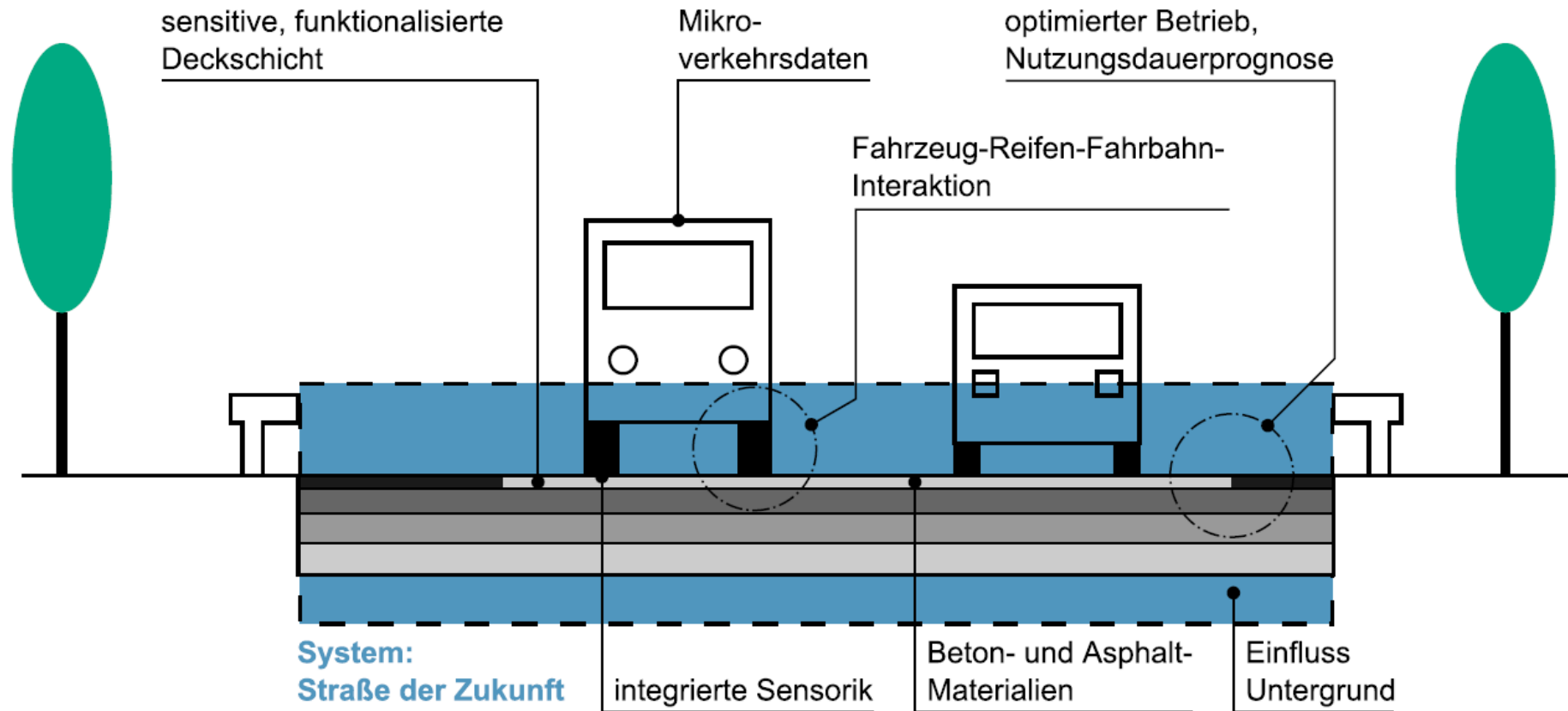
Grundidee



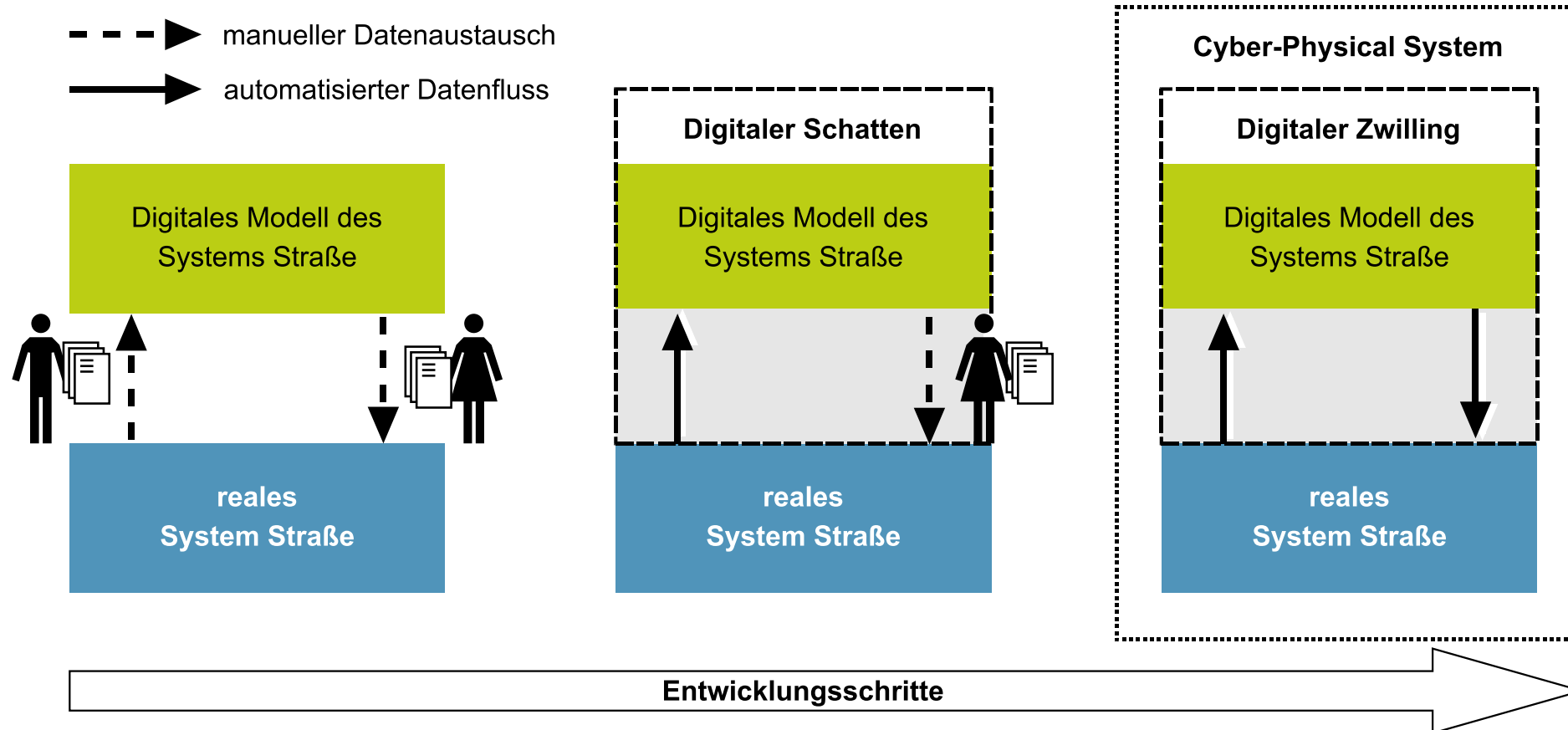
Kernziele

- ▶ Schaffung der methodische Grundlagen für die Realisierung eines Digitalen Zwillings „Straße“
- ▶ Entwicklung von Methoden für die Analyse und Steuerung (Pavement Management) des zukünftigen Systems Straße für einen intelligenten, schonenden und nachhaltigen Betrieb / Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur

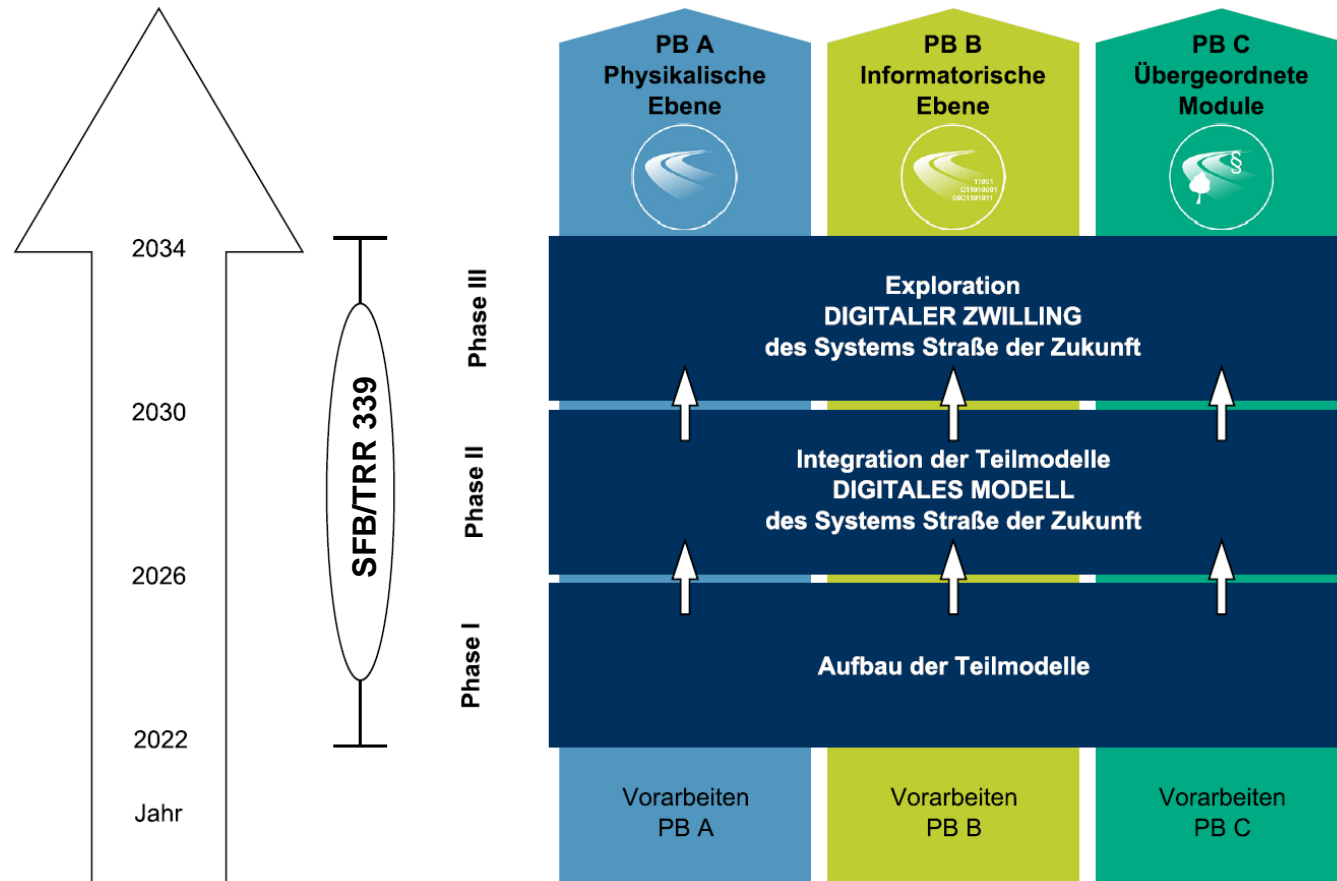
Betrachtungsgegenstand – bautechnische Sicht



Entwicklungsschritte

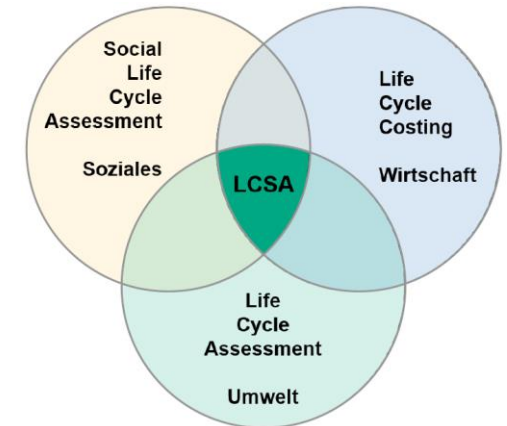
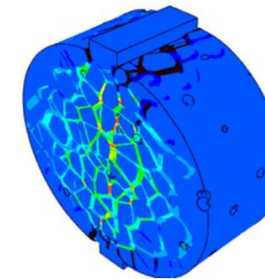
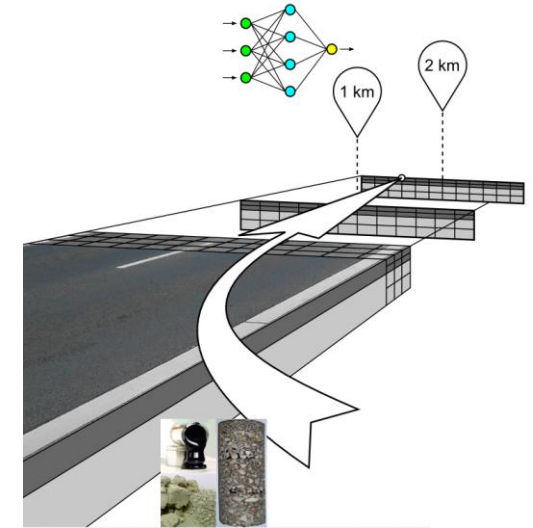
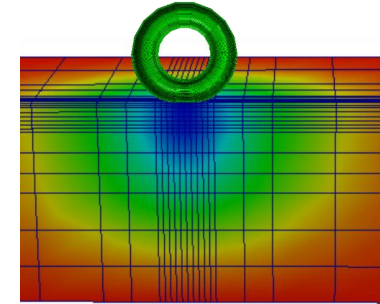


Entwicklungsstufen / Reifegrade

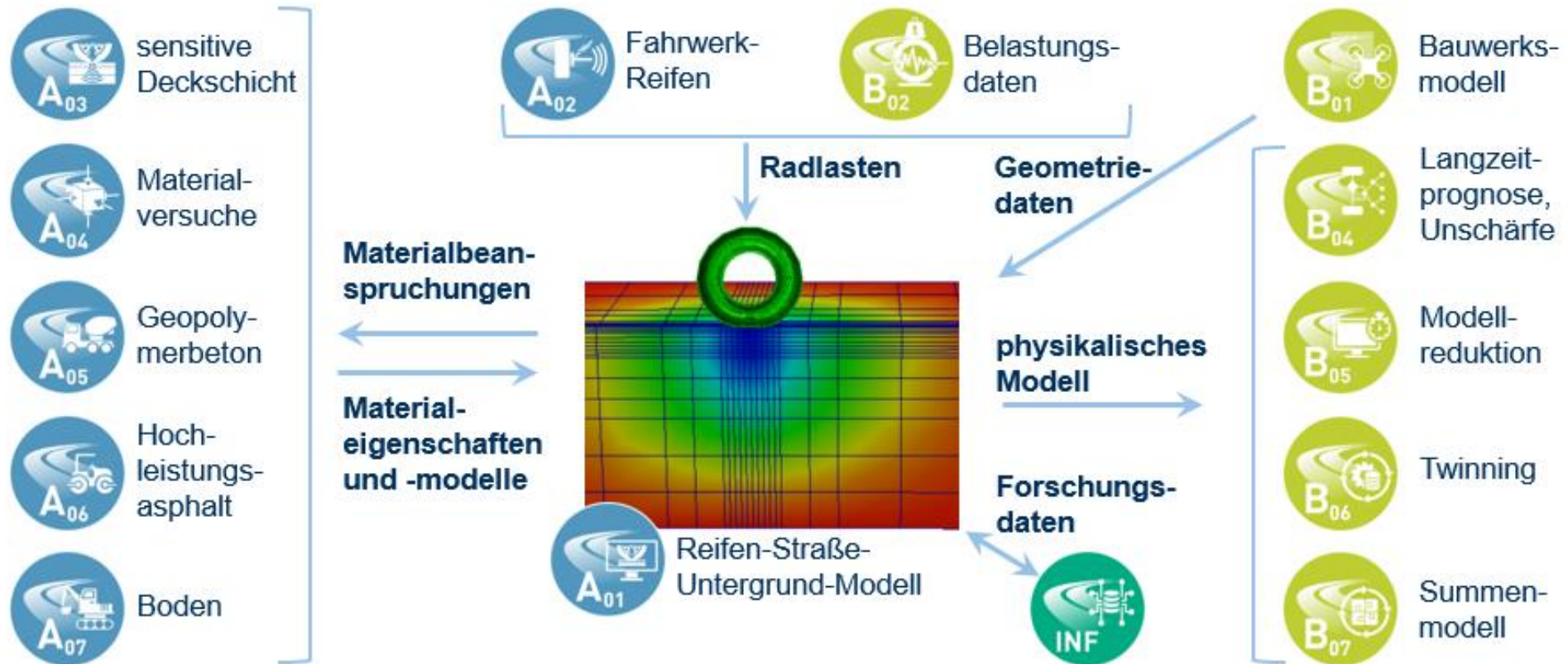


Inhaltliche Ebenen

- Physikalische **Ebene A**
 - Multi-physikalische Simulationsmodelle des Systems Straße
 - Neuartige, nachhaltige, multifunktionale Hochleistungsbaustoffe
 - Sensoren und sensitive Materialien
- Informatorische **Ebene B**
 - Datenübertragungskonzepte
 - Informatorische Abbildung des Systems Straße (Bauwerksinformationsmodell)
 - Methoden zur Konsistenzhaltung der Sensor- und Simulationsdaten (Twinning)
 - Beschleunigte Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung von Unschärfe
- Übergeordnete **Aspekte C**
 - Nachhaltigkeit
 - Rechtliche Fragen
- Administrationsprojekte **Z**
 - Projektleitung
 - Datenmanagement



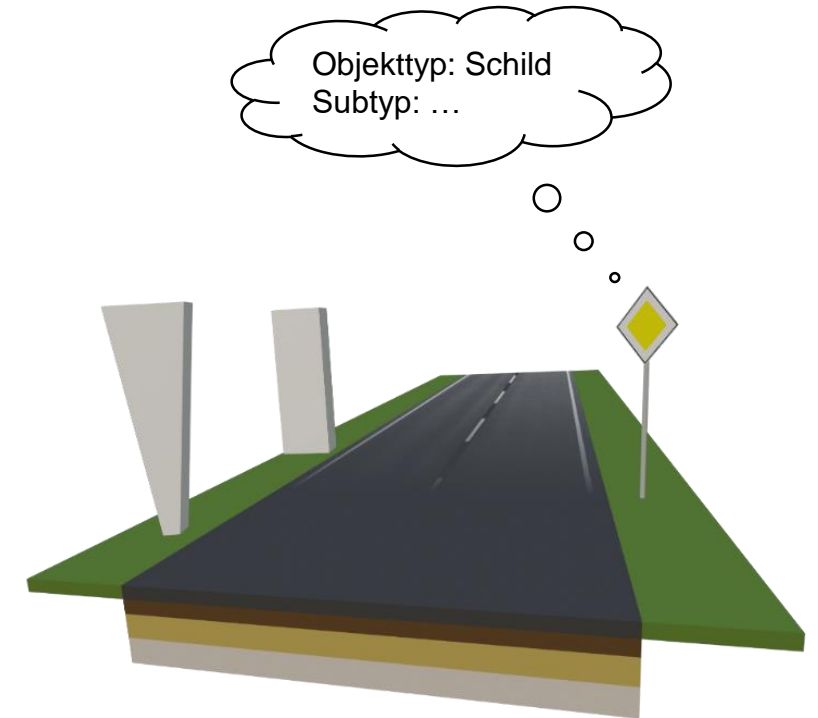
Vernetzung – Beispiel Teilprojekt A₀₁



Geodätische Aspekte im SFB/TRR 339

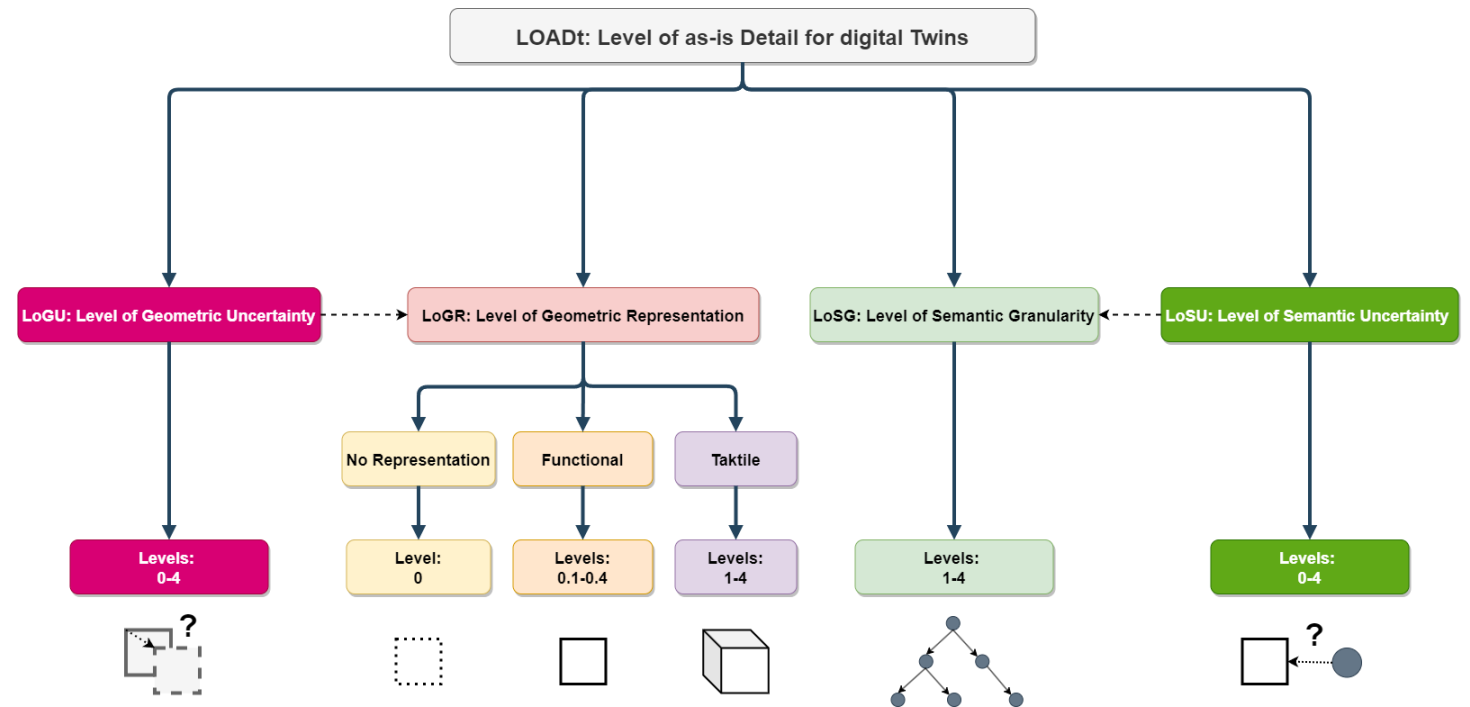
Geometrisch-semantisches multi-LOD as-is Bauwerksmodell

- Viele Anwendungsfälle erfordern **georeferenzierte, semantische und/oder geometrische** Informationen über die Straße
- Unterschiedliche Anwendungsfälle bedürfen **verschiedene Granularitäten** (Level of Detail, LOD) in der semantischen und geometrischen Darstellung
- Digitale Zwillinge benötigen Daten über den **tatsächlichen (Ist-)Zustand** (→ as-is Modelle)
- As-is Modelle können aus **Erfassungsdaten (Reality Capture)** abgeleitet werden
- Modellerzeugung sollte mit **hohem Automatisierungsgrad** erfolgen (→ Zeit- und Kosteneinsparung)
- Bei as-is Modellen muss die **Imperfektion des Modells** (Unsicherheiten und Fehler) berücksichtigt werden



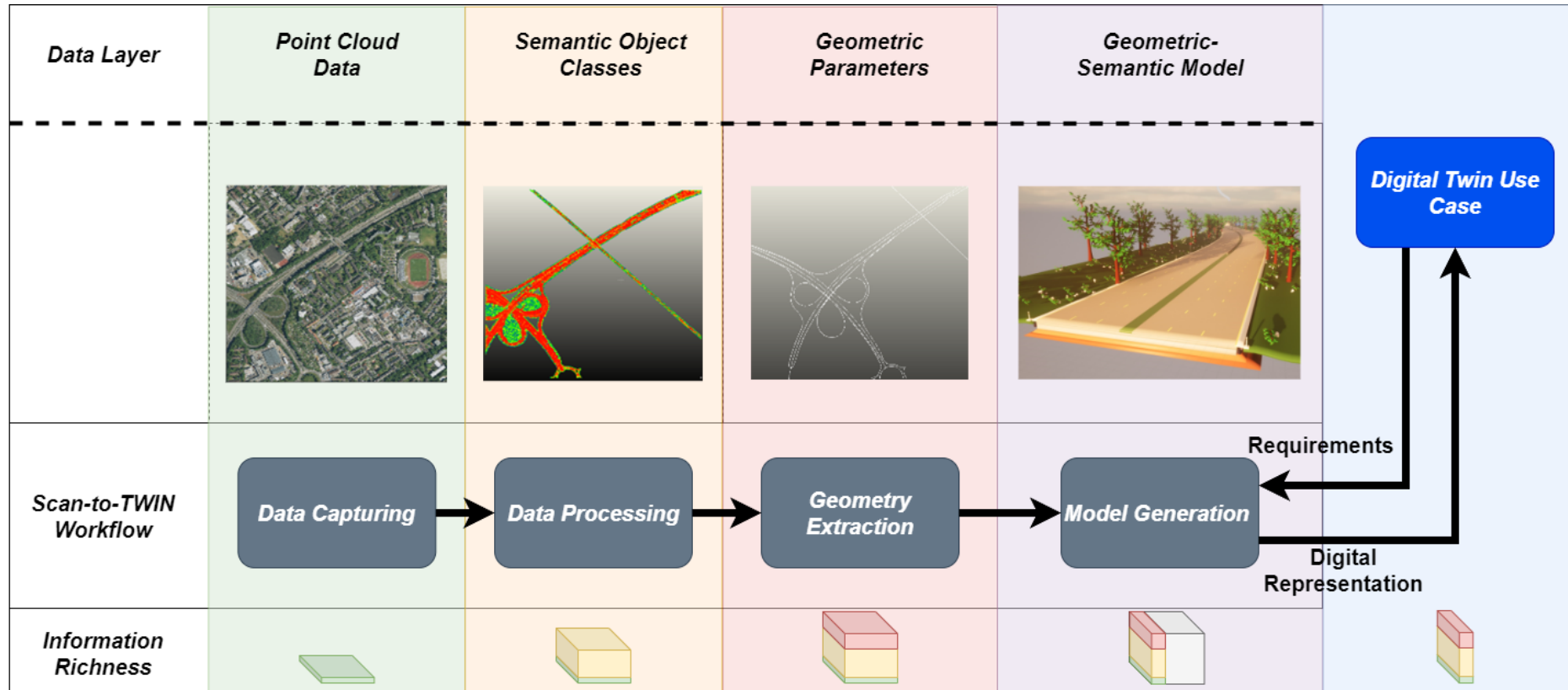
Konzept zur Strukturierung unterschiedlicher Digitaler Modelle für Digitale Zwillinge

- Trennung von **Semantik** und **Geometrie**
- **Quantifizierung der Unsicherheiten** innerhalb beider Aspekte
- Repräsentation muss auf den Use Case angepasst werden
- Definition der Use Case Anforderungen anhand des Konzepts
- Basierend auf Anforderungen:
→ Modellbildung mittels Teilmenge der verfügbaren Informationen



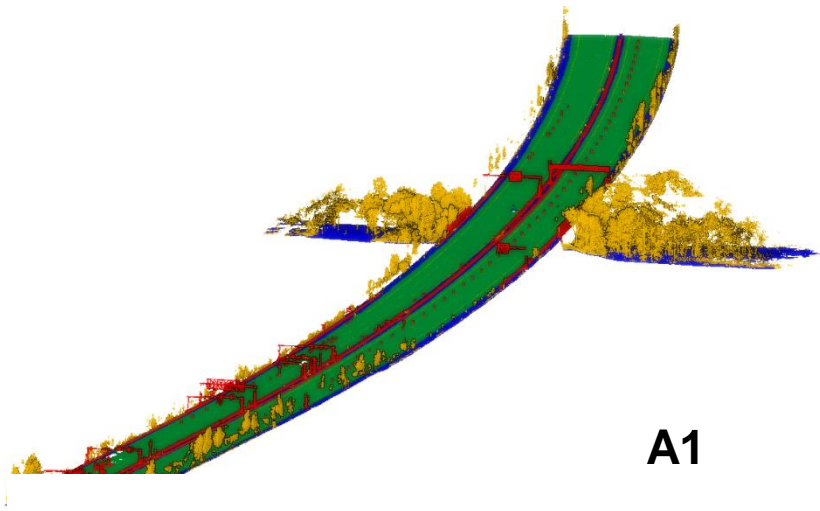
Crampen, D., Hein, M., Blankenbach, J. (2024): *A Level of As-Is Detail Concept for Digital Twins of Roads—A Case Study*. In: Kolbe, T.H., Donaubauer, A., Beil, C. (eds): *Recent Advances in 3D Geoinformation Science*. 3DGeoInfo 2023. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43699-4_31

Pipeline von der Datenerfassung zum geometrisch-semanticen Modell

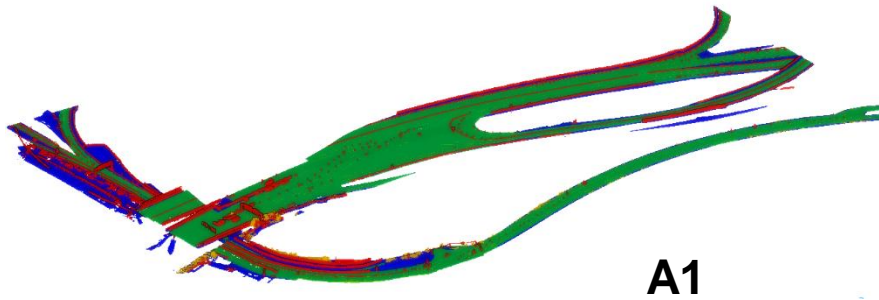


Crampen, D., Hein, M., and Blankenbach, J.: RoadGen4Twins: A Modular Approach for Generating Multi-Purpose Geometric-Semantic Models for Digital Twins of Roads, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-4/W5-2024, 103–110, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-103-2024>, 2024.

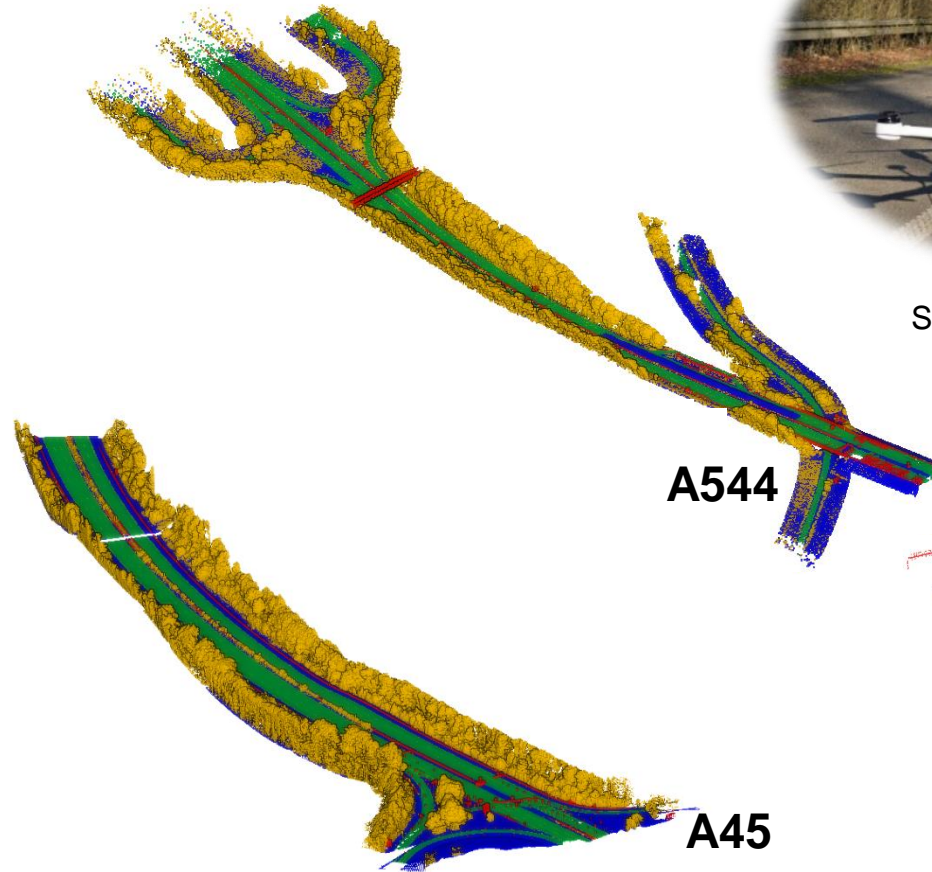
Messkampagnen auf gesperrten Autobahnabschnitten



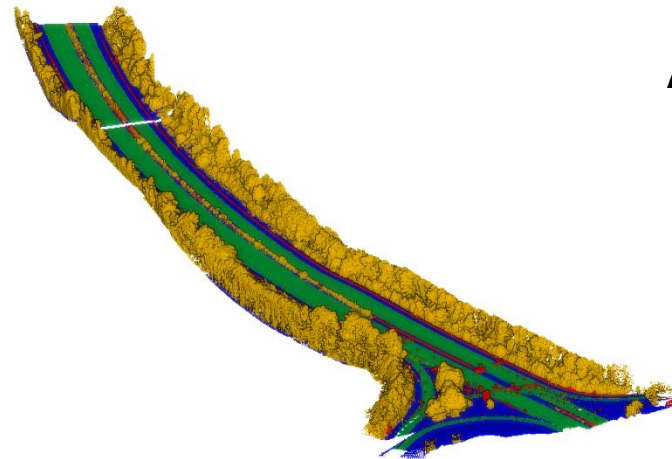
A1



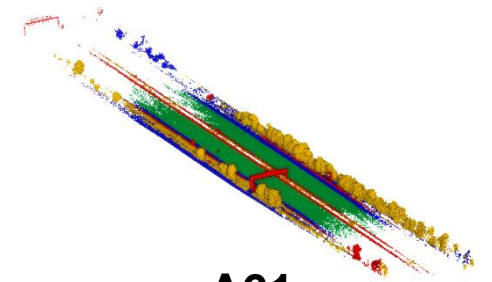
A1



A544



A45



A61

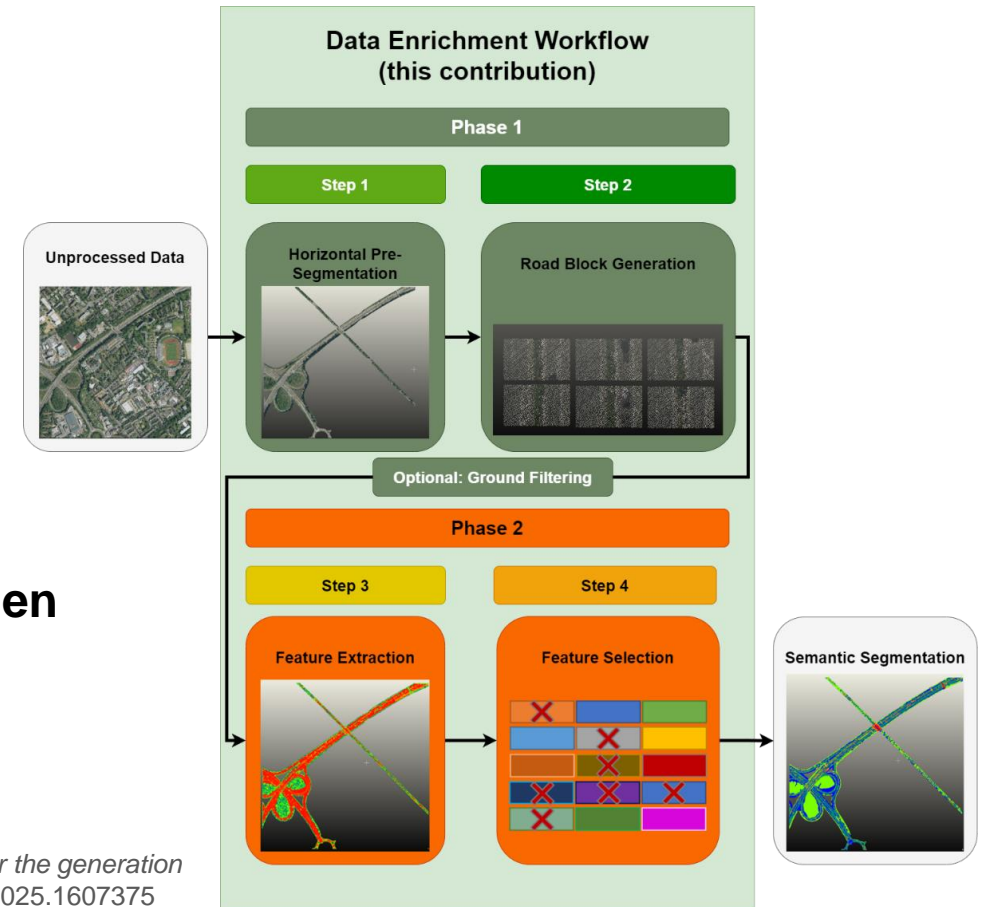


Scanner: Riegl miniVUX-3UAV

Geodaten & Vorwissen zur Optimierung von Machine Learning-Verfahren

- Grob- und Feinsegmentierung der Eingangsdaten
- Teilschritte:
 1. Horizontale Vorsegmentierung
 2. Vertikale Vorsegmentierung
 3. Merkmalsextraktion
 4. Selektion aussagekräftiger Merkmale
- Prozess untersucht auf ALS- und MLS-Daten
- Validiert mit 6 verschiedenen **Machine / Deep Learning-Methoden**

→ Jeder Prozessschritt erhöht die Qualität des trainierten Modells



Crampen, D.; Blankenbach, J. (2025): *Data enrichment for semantic segmentation of point clouds for the generation of geometric-semantic road models*. Frontiers in Built Environment, Volume: 11, DOI: 10.3389/fbuil.2025.1607375

Erweiterung des Datensatzes für semantische Segmentierung & Geometrieregession

- Prozess zur Erzeugung synthetischer Datensätze aus:
 - Punktwolke
 - Klassenweiser Annotationen
 - 3D-Model
 - Geometrieparameter

→ in 12 Minuten zum synthetischen Datensatz:

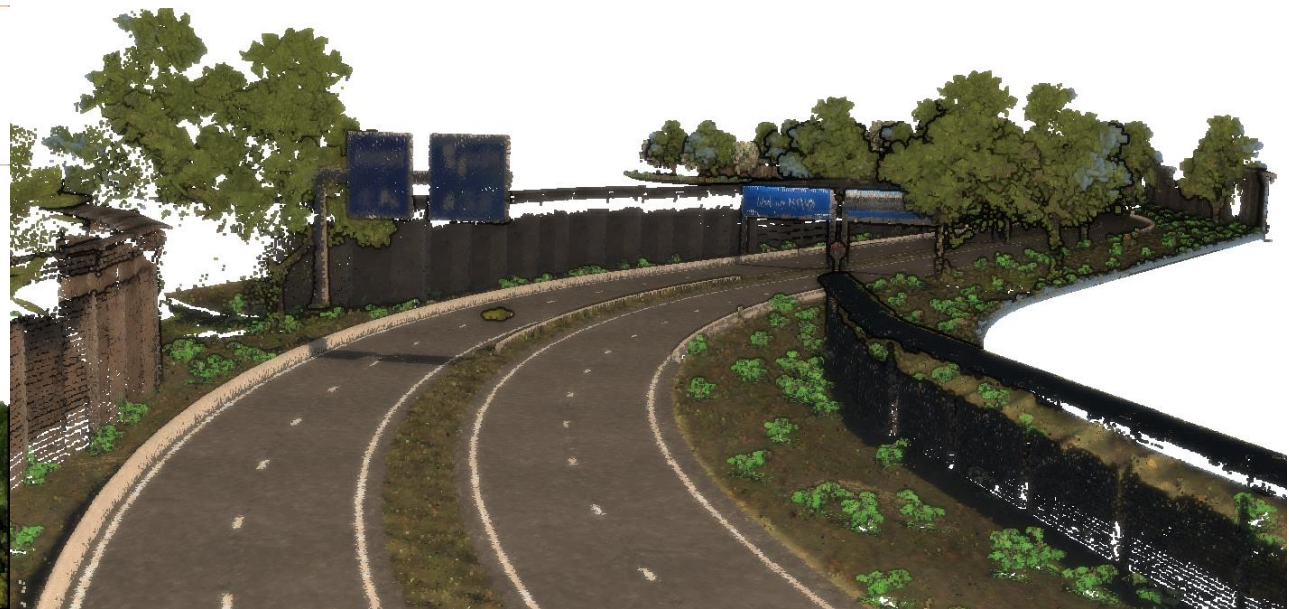
Process Step	Domain	Time in (s)
Parameter Generation	Python	20
Model Loading & Cooking	Unreal Engine	186
Model Baking	Unreal Engine	154
Scan Preparation	Unreal Engine	38
Scanning	Unreal Engine	180
Scan Merging	Python	48
Roughness Adjustment	Python	100
Full Process	Unreal Engine & Python	726



Erweiterung des Datensatzes für semantische Segmentierung & Geometrieregession



Reale Punktwolke mit Annotation



Synthetische Punktwolke mit Annotation

Objekt-orientierte Bauwerksinformationsmodelle effizient erzeugen

Komplementäre Verfahren:

- **Regelbasierte automatische Extraktion** der Mittelachsen, Fahrbahnbegrenzungen etc. zur Definition des Straßenkorridors

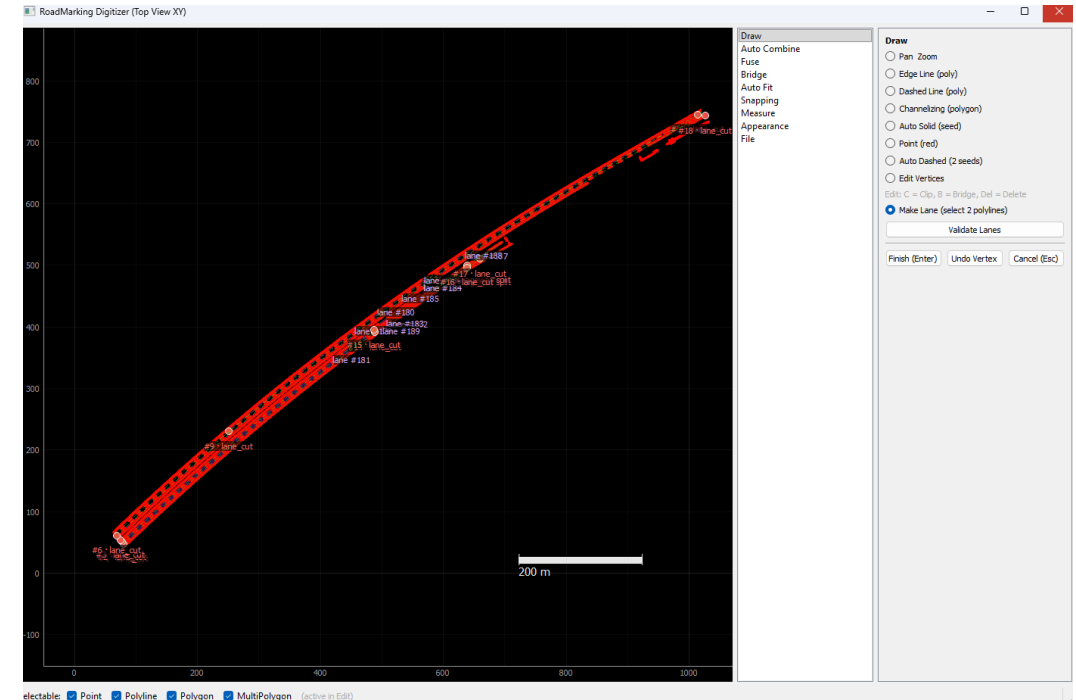


Automatisch erzeugter Straßenkorridor im lanelet2-Format
auf Basis einer segmentierten Punktwolke

Objekt-orientierte Bauwerksinformationsmodelle effizient erzeugen

Komplementäre Verfahren:

- **Regelbasierte automatische Extraktion** der Mittelachsen, Fahrbahnbegrenzungen etc. zur Definition des Straßenkorridors
- Zusätzliches interaktives Tool zur **semi-automatischen Extraktion** der Straßengeometrie



Interaktive Geometrieextraktion (auch für Annotation von Trainingsdaten für Verfahren 3)

Objekt-orientierte Bauwerksinformationsmodelle effizient erzeugen

Komplementäre Verfahren:

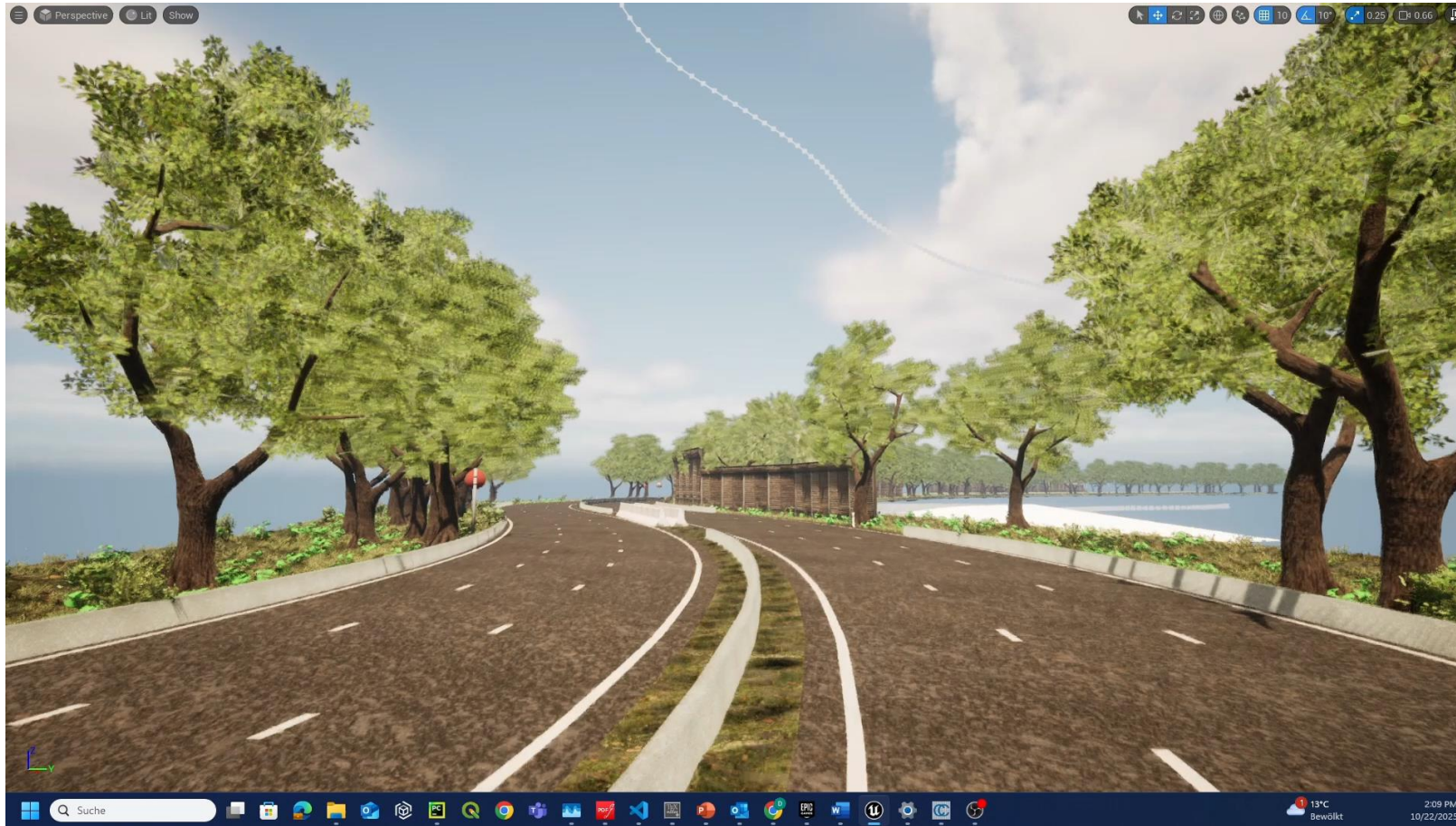
- **Regelbasierte automatische Extraktion** der Mittelachsen, Fahrbahnbegrenzungen etc. zur Definition des Straßenkorridors
- Zusätzliches interaktives Tool zur **semi-automatischen Extraktion** der Straßengeometrie
- **Deep Learning-Modell** zur robusten, vollautomatischen **datengetriebenen** Geometrieextraktion aus Punktwolken



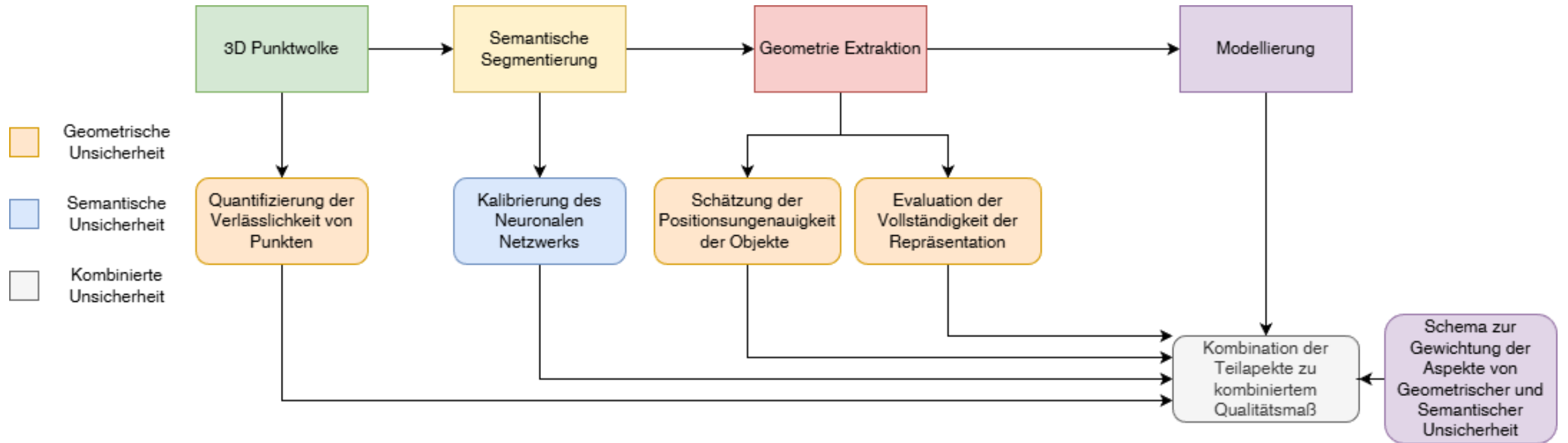
Automatische Extraktion von Fahrspurgeometrien

Geometrisch-semantisches as-is Modell

Beispiele erzeugter 3D-GSM funktionalisierbar in Game Engines

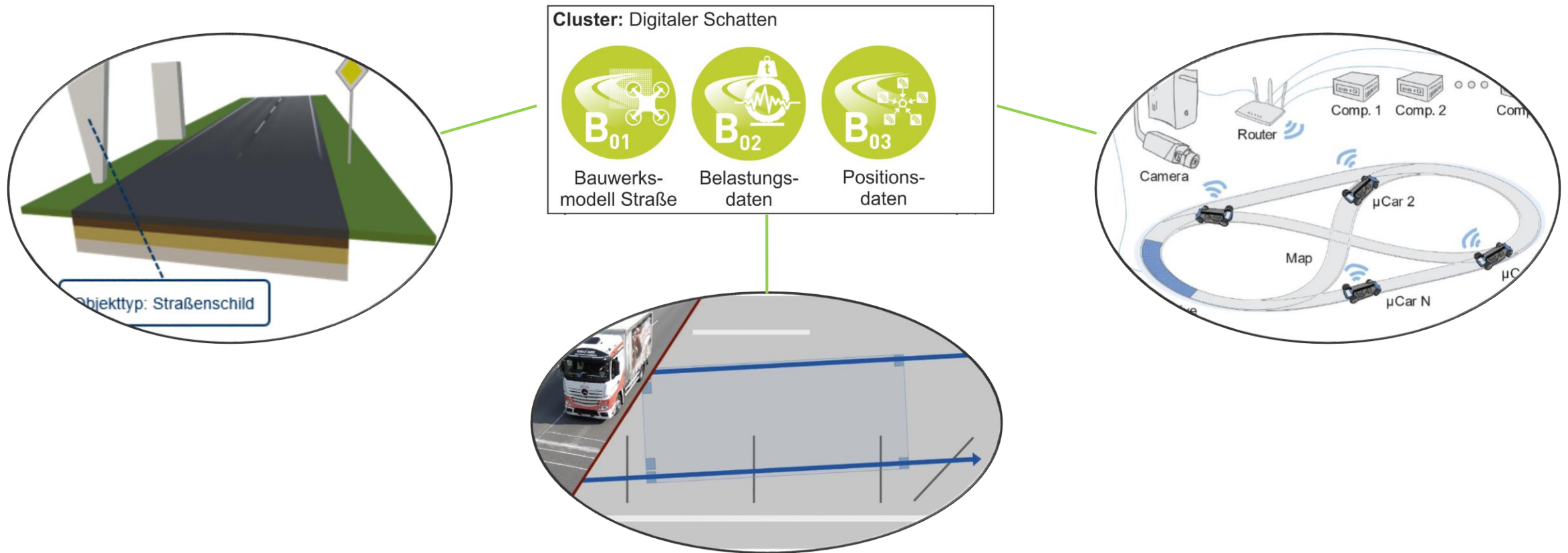


Unsicherheitsquantifizierung (work in progress)

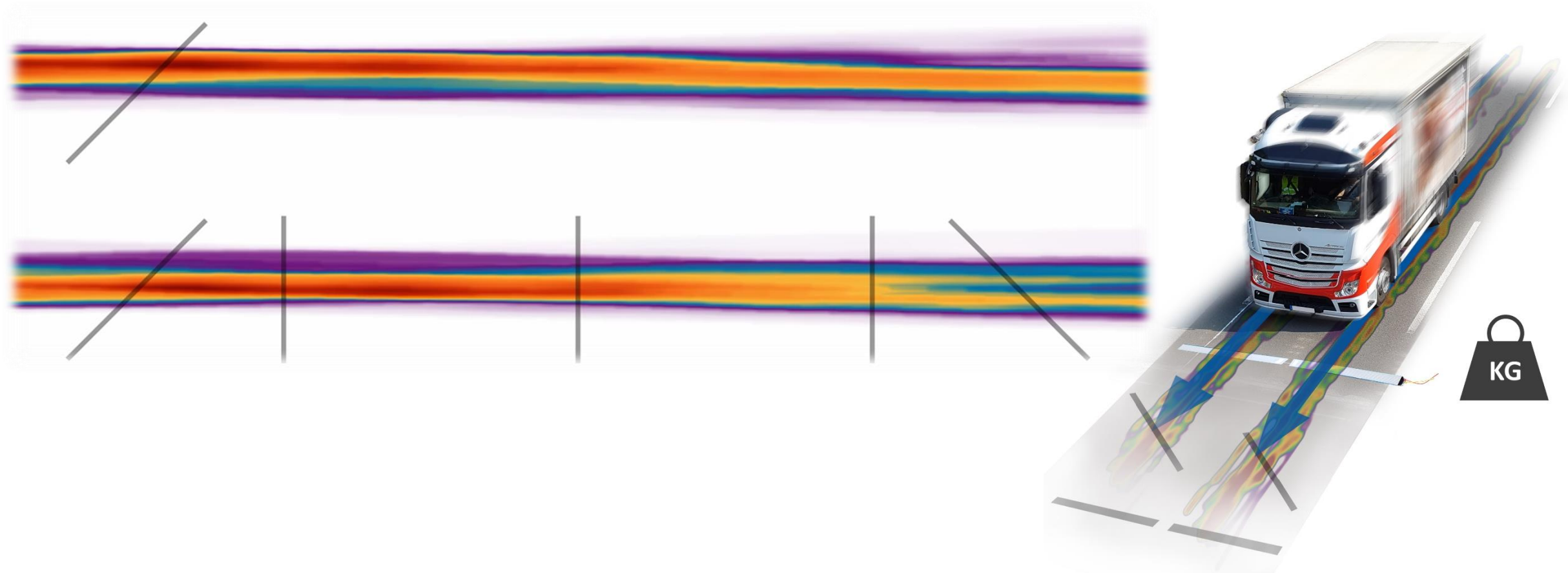


Showcase „Digitaler Schatten“

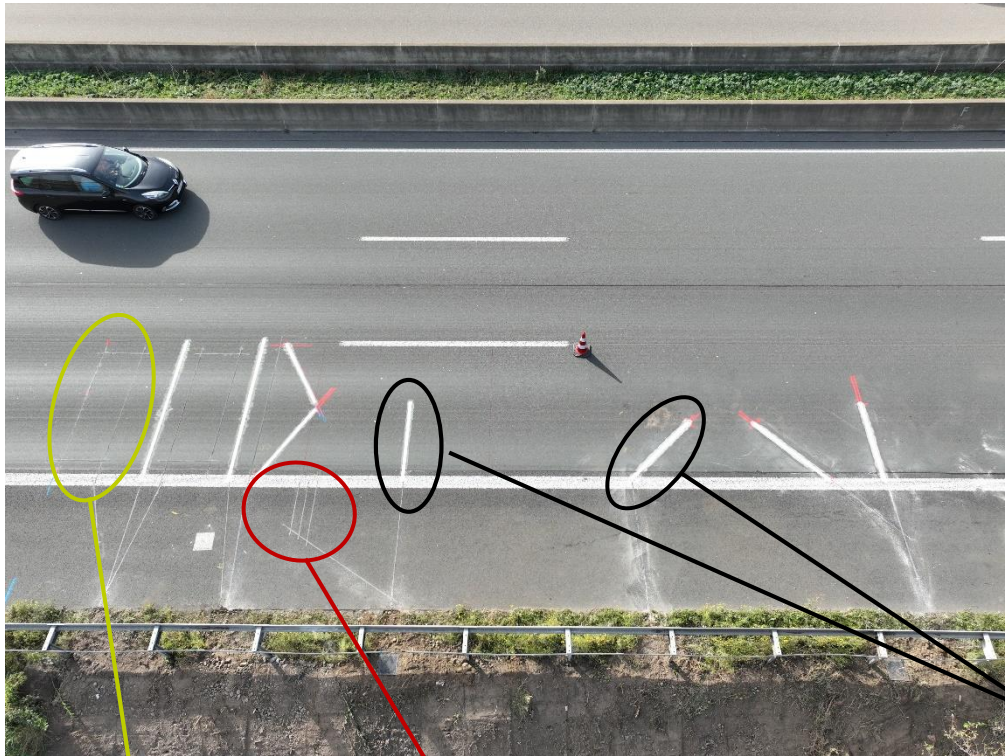
Showcase „Digitaler Schatten“ – BIM, GIM und IoT



Virtueller räumlicher Lasteintrag in die Straßeninfrastruktur



Lasteintrag am realen Bauwerk – Weigh-in-Motion



2 Induktionsschleifen

3 Temperatursensoren
• 4cm, 8cm, 12cm Einbautiefe

Wind

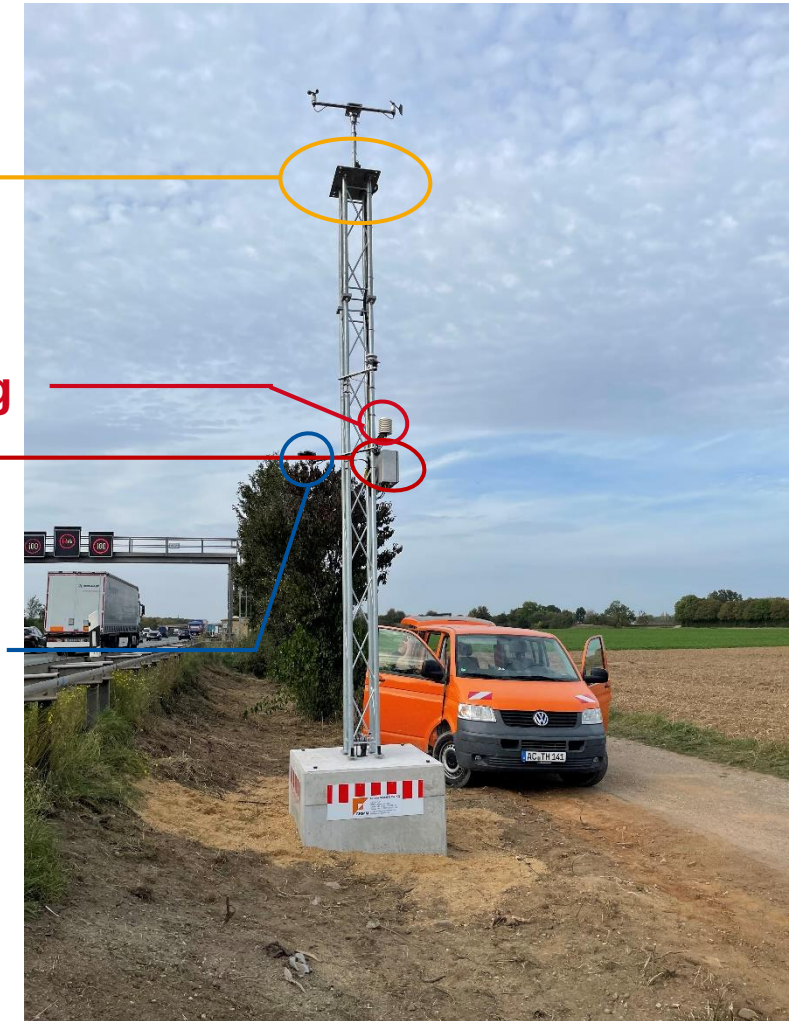
- Richtung
- Geschwindigkeit

Sonneneinstrahlung
(Luft) **Temperatur & Feuchtigkeit**

Regen
(ja/nein)

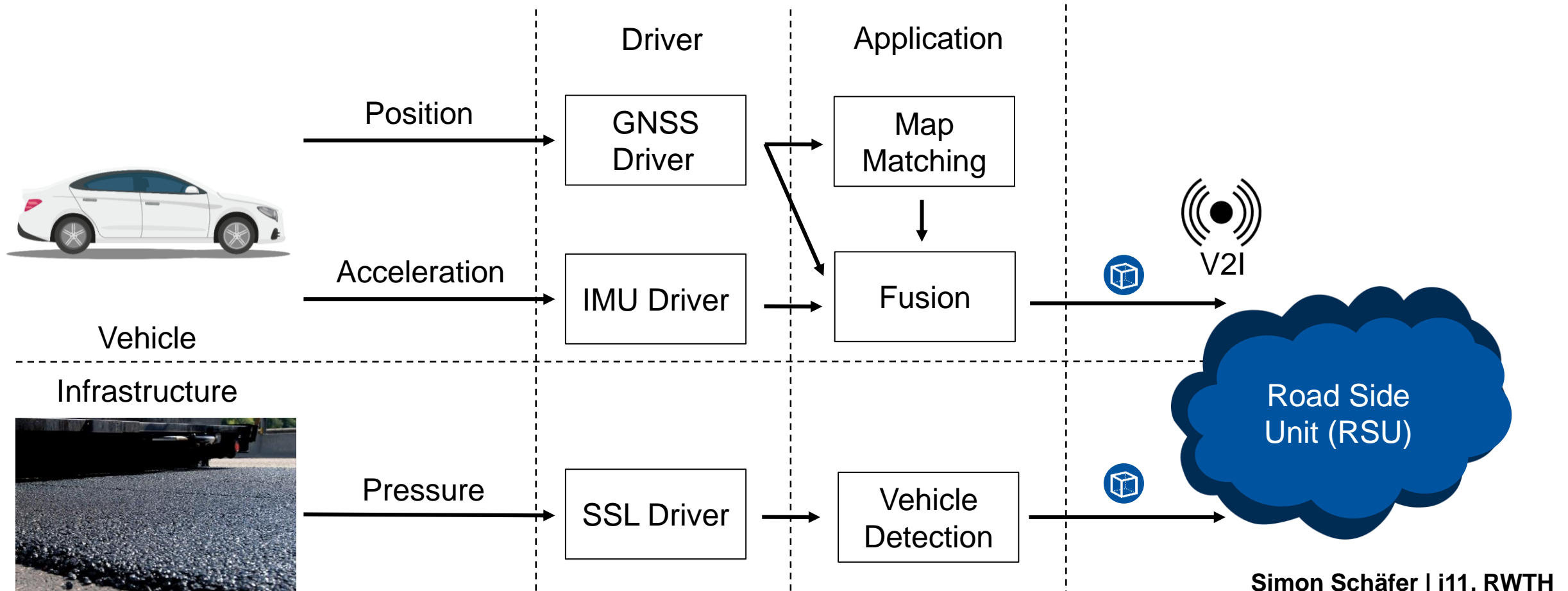
10 digitale WIM-Sensoren

- 4 schräg verbaut



Moritz Hagmanns| isac, RWTH

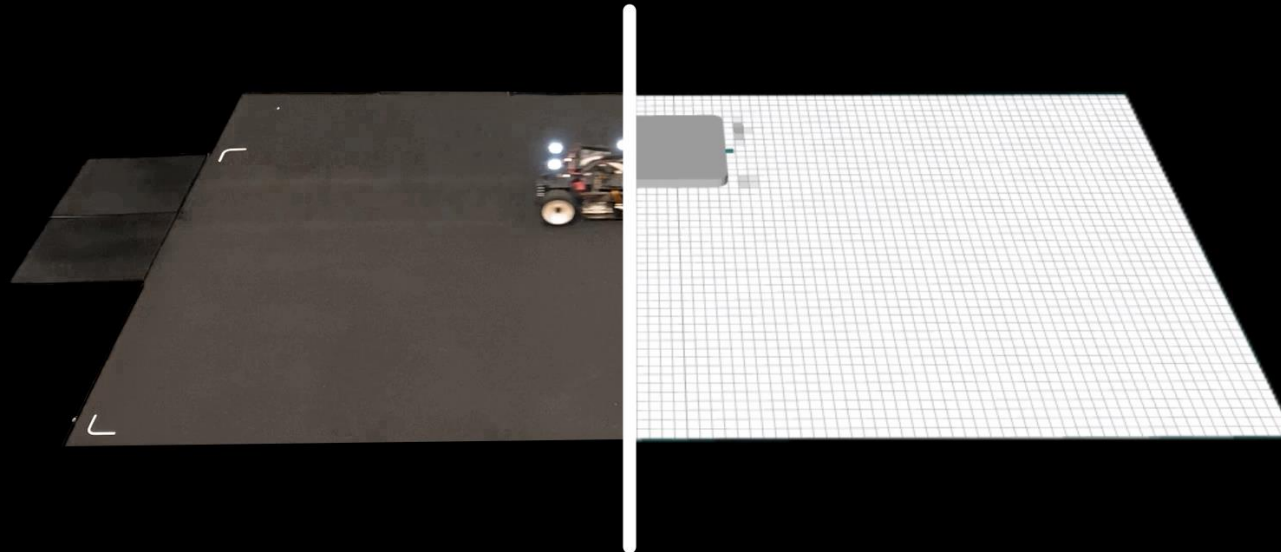
Präzise Ermittlung und Vorhersage der Reifenposition



Simon Schäfer | i11, RWTH

Präzise Ermittlung und Vorhersage der Reifenposition

Identified Vehicle



Simon Schäfer | i11, RWTH

Geometrisch-semantisches as-is Modell des Autobahnabschnitts

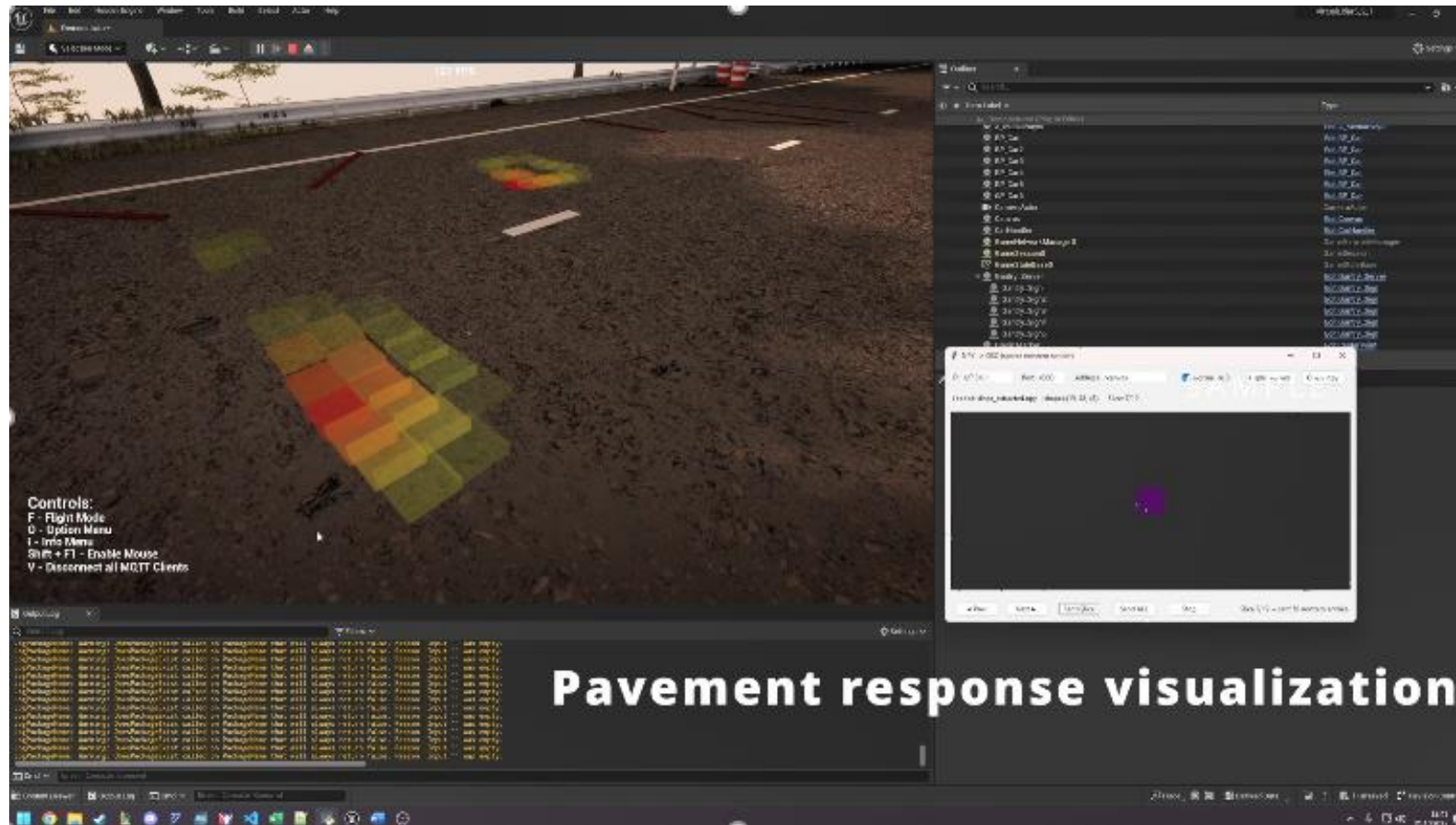


David Crampen | gia, RWTH

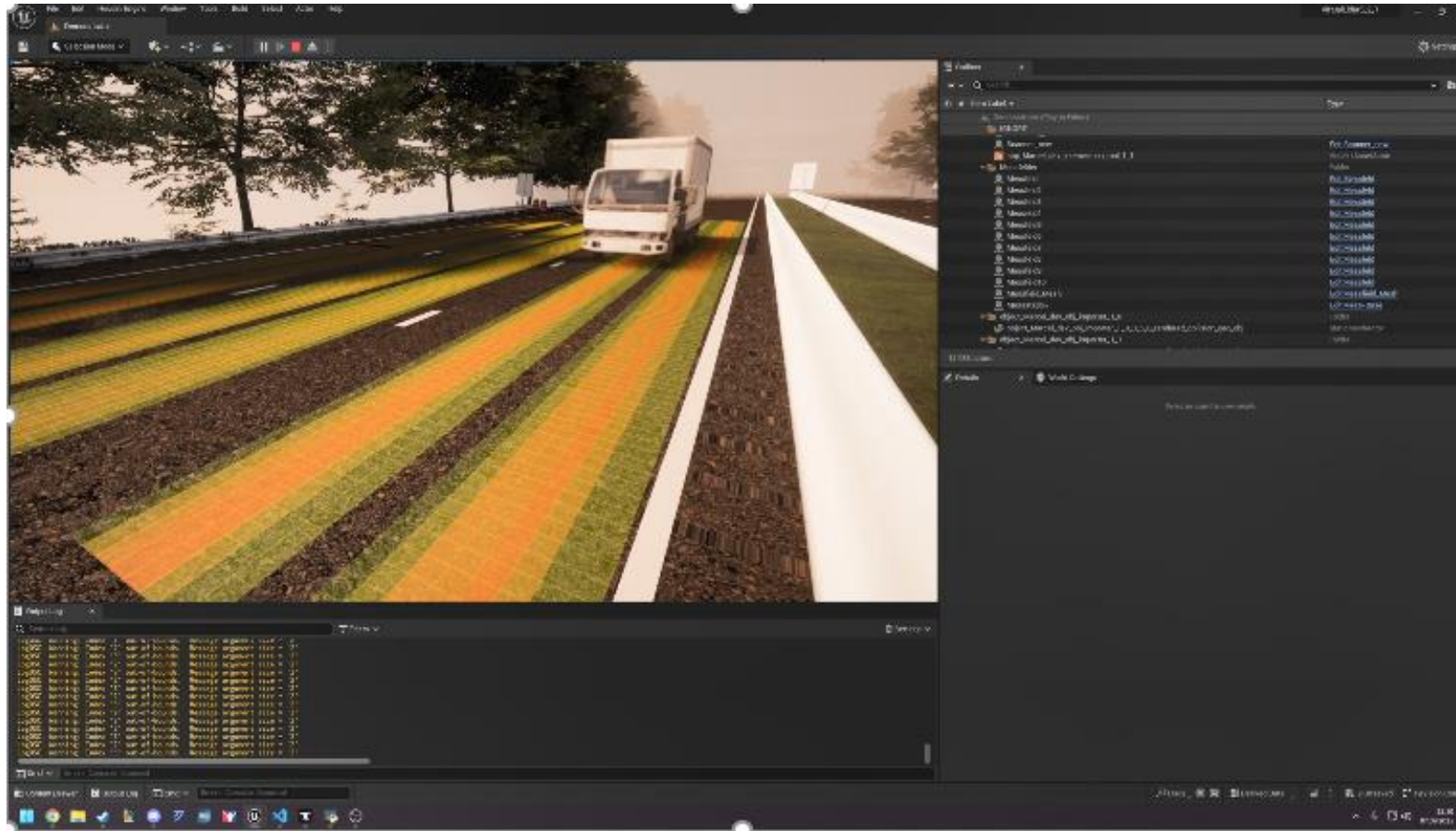
Showcase „Digitaler Schatten“



Showcase „Digitaler Schatten“



Showcase „Digitaler Schatten“



Zusammenfassung / Fazit

- Konzept „Digitaler Zwilling“ bietet grundsätzlich mehr als nur eine „neue Verpackung“
 - derzeit häufig als Buzzword für Vieles verwendet
- Digitale Bauwerkszwillinge können den Digitalisierungsgrad in vielen potenziellen Anwendungsbereichen – insbesondere für die Nutzungsphase – signifikant steigern und Prozesse verbessern
 - **Integration** unterschiedlicher Daten, Modelle, Algorithmen und Anwendungen
 - Einbindung von **Echtzeitdaten** und **-Simulationen**
- BIM und Vermessung/GIM liefern wesentliche Basisdaten für digitale Zwillinge der bebauten Umwelt
- Junges Thema mit einigen Herausforderungen, u.a.:
 - Digitalisierung (des Bestands)
 - Datenintegration
 - Twinning

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit