



# 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



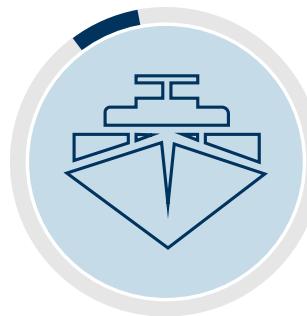
71,3 %

Straßenverkehr



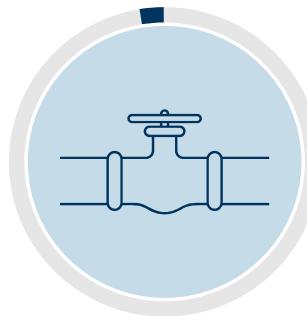
20,0 %

Eisenbahnen



6,2 %

Binnenschifffahrt



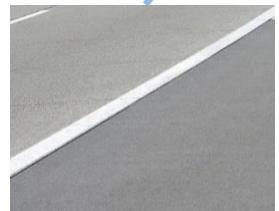
2,6 %

Rohrfernleitungen

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

# Motivation – Ausgangssituation

## Straßeninfrastruktur heute



nur Lastabtrag?



Ressourcen- und Energieeffizienz



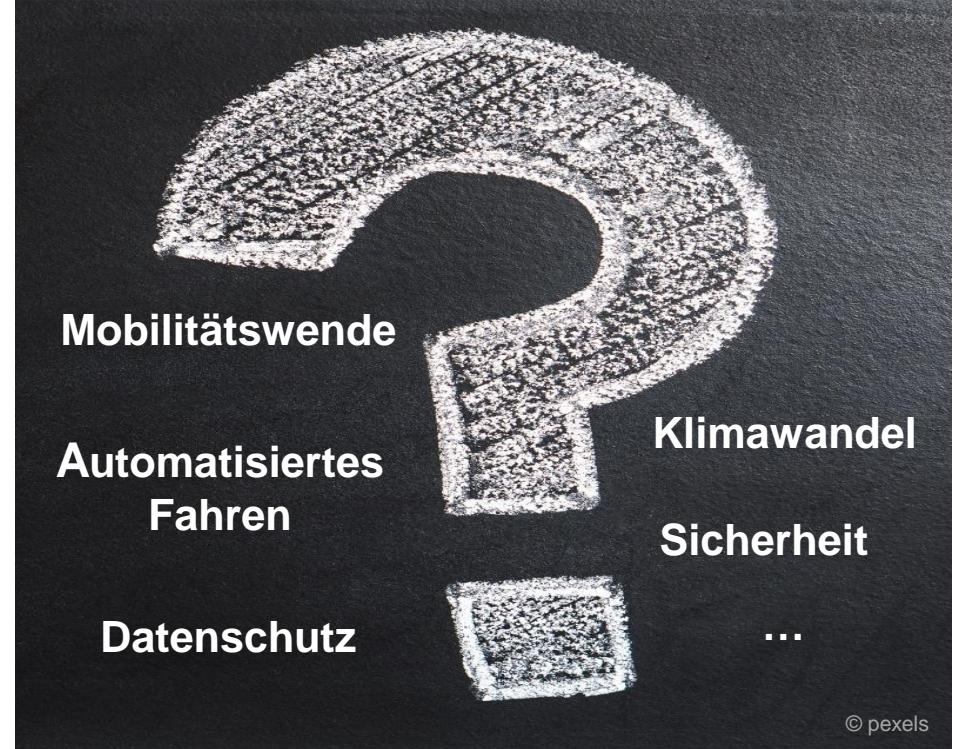
Verkehrszunahme



Belastungen



Mangelnde Haltbarkeit



Zukünftige Herausforderungen

## Agenda

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



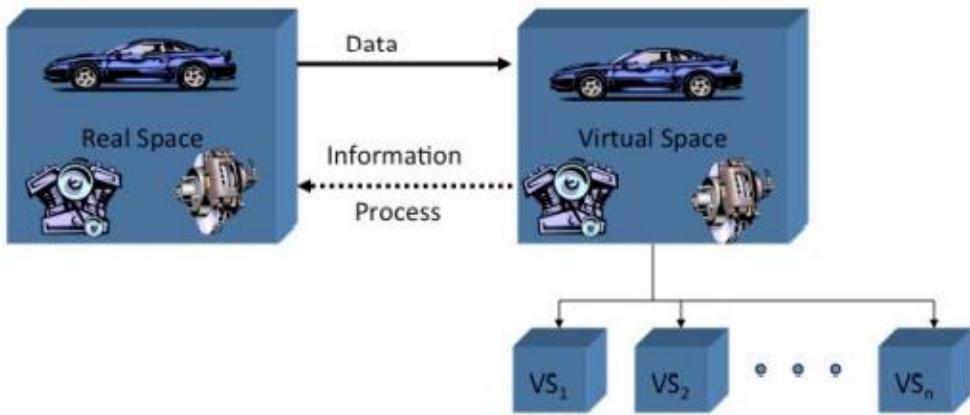
# Was ist ein Digitaler Zwilling?

---

# 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.”*

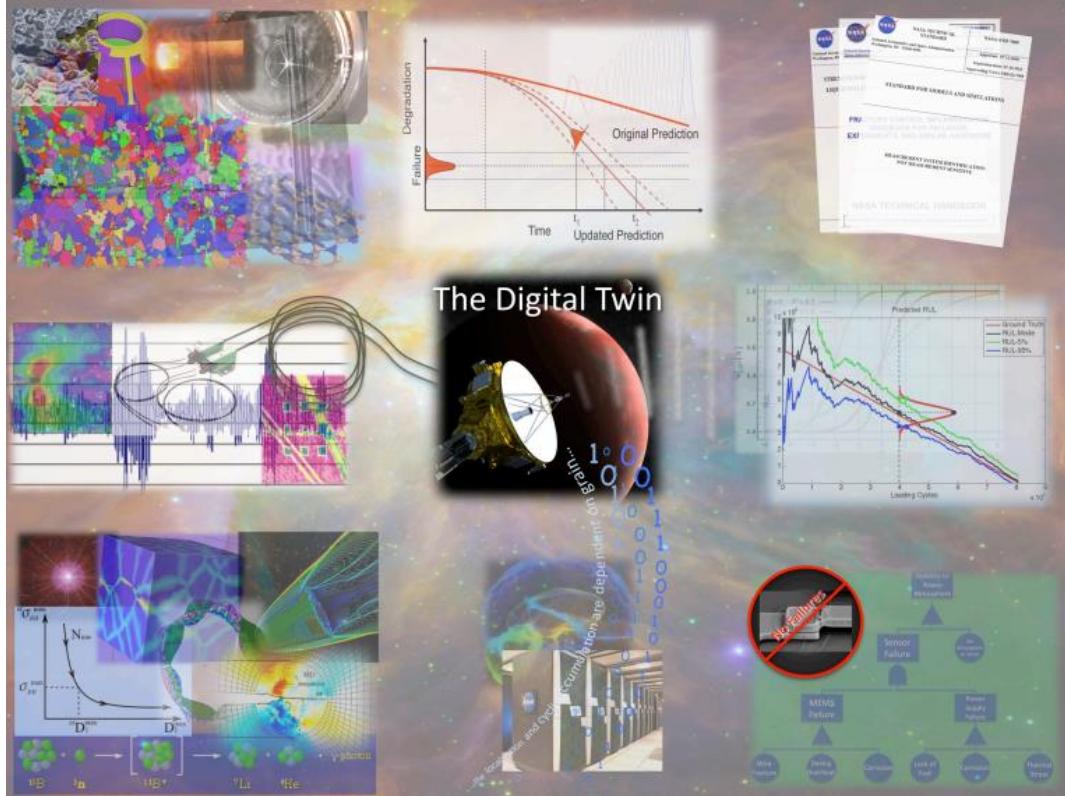
(Grieves, M., 2014)

(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

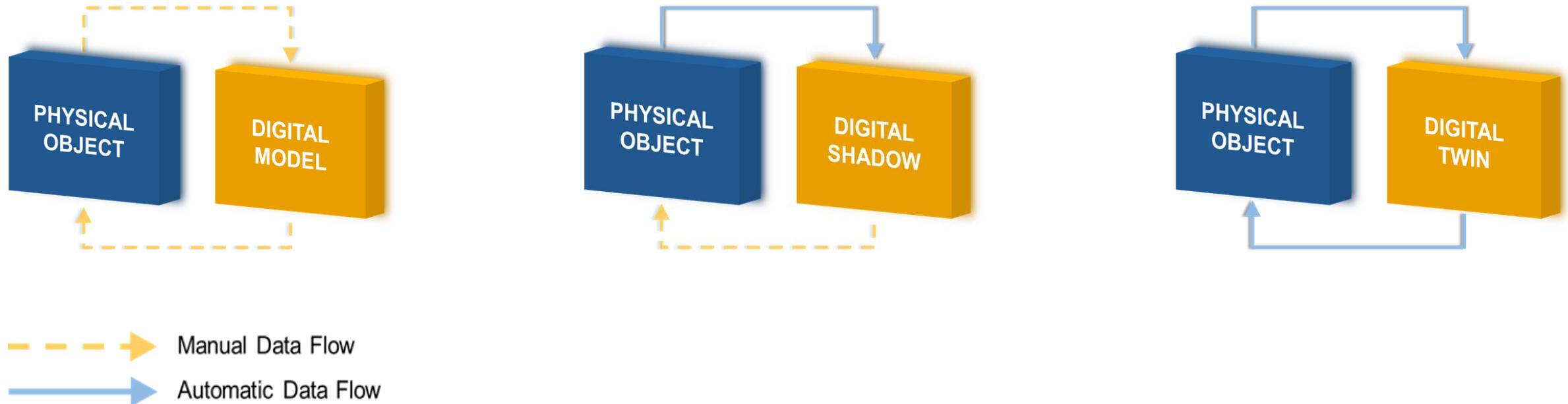


*“A Digital Twin is an **integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation** of an **as-built vehicle** or system that uses the best available **physical models, sensor updates, fleet history**, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic 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



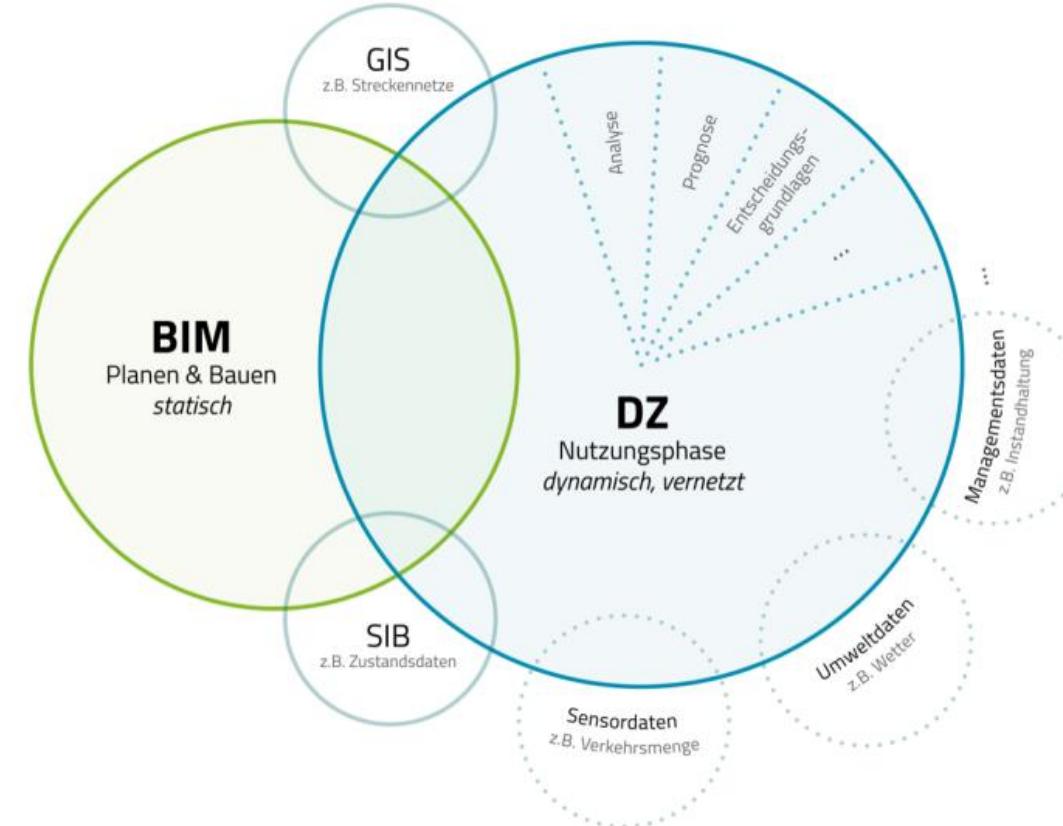
(Quelle: in Anlehnung an: Tchana et al. (2019):  
Designing a unique Digital Twin for linear  
infrastructures lifecycle management, Procedia CIRP,  
vol. 84, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>)

# 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 **bidirektionalem Daten- und Informationsaustausch** optimierte Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Management im Lebenszyklus der Infrastruktur.“

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



# **SFB/TRR 339 „Digitaler Zwilling Straße“**

---

Physikalisch-informatorische Abbildung des Systems „Straße der Zukunft“

## Digitaler Zwilling Straße

[www.sfbtrr339.de](http://www.sfbtrr339.de)  
visit us!

20  
Teilprojekte

14  
Institute

seit  
01.01.2022



TU Dresden

Sprecher

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

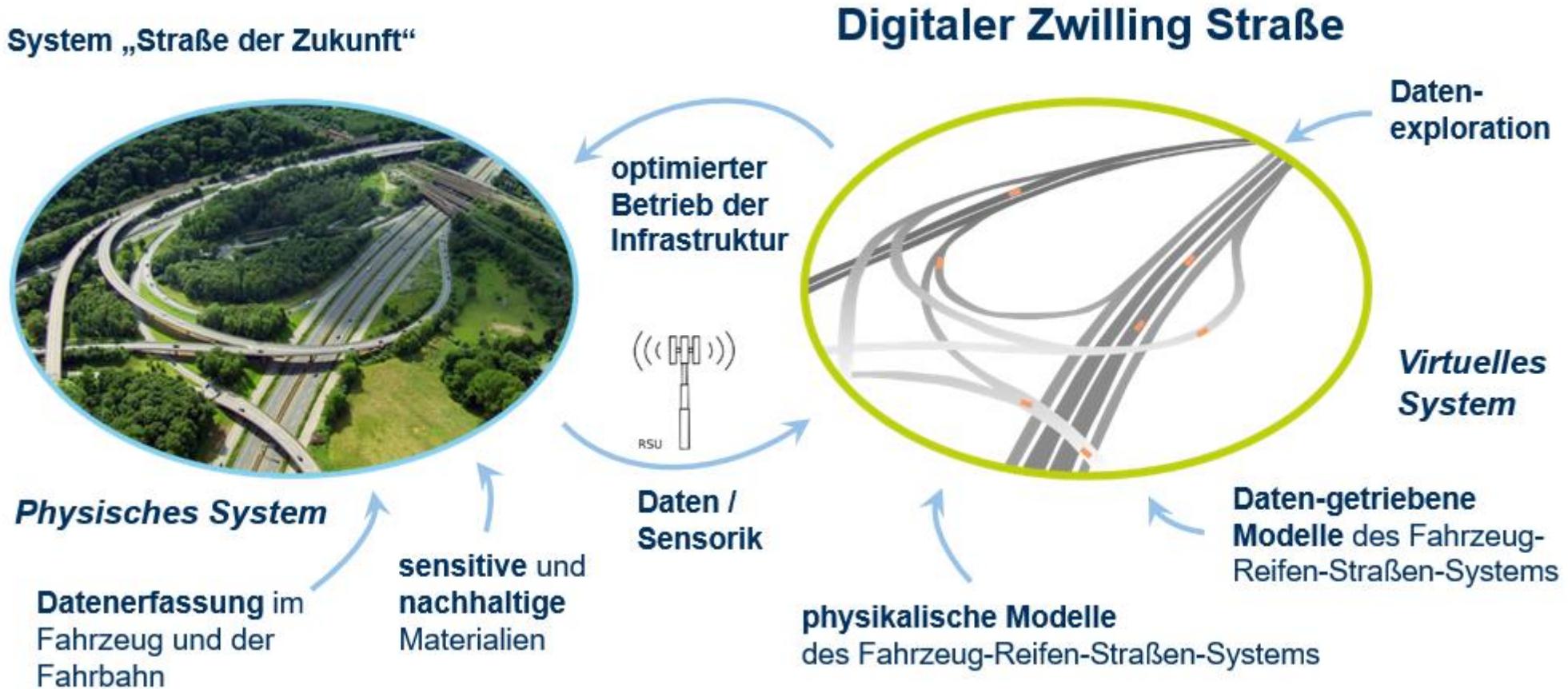


RWTH Aachen

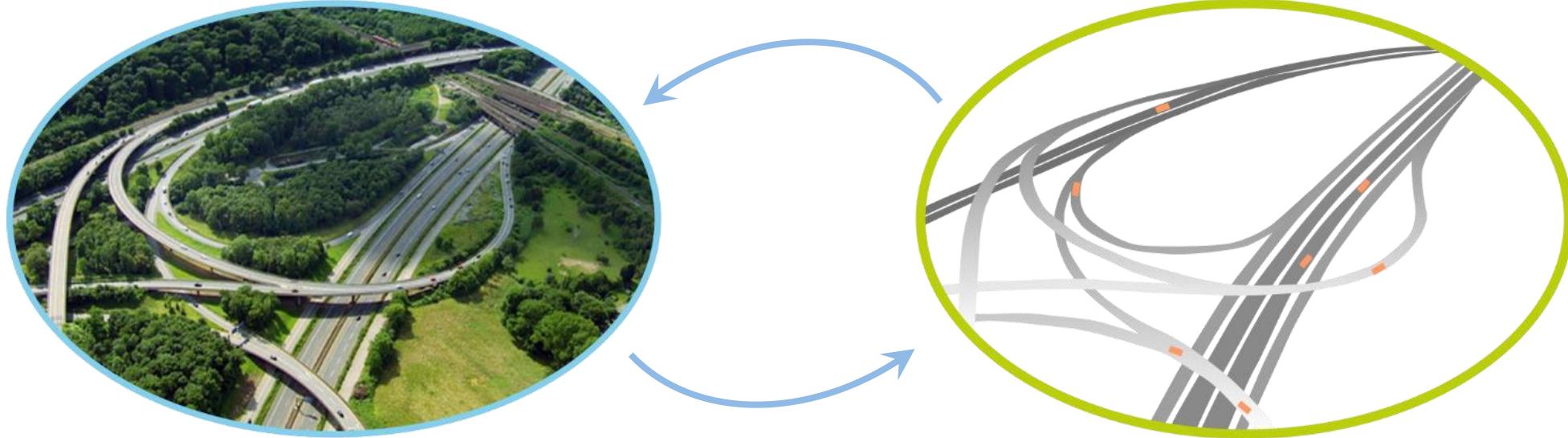
Stellvertretende Sprecher

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

## Grundidee



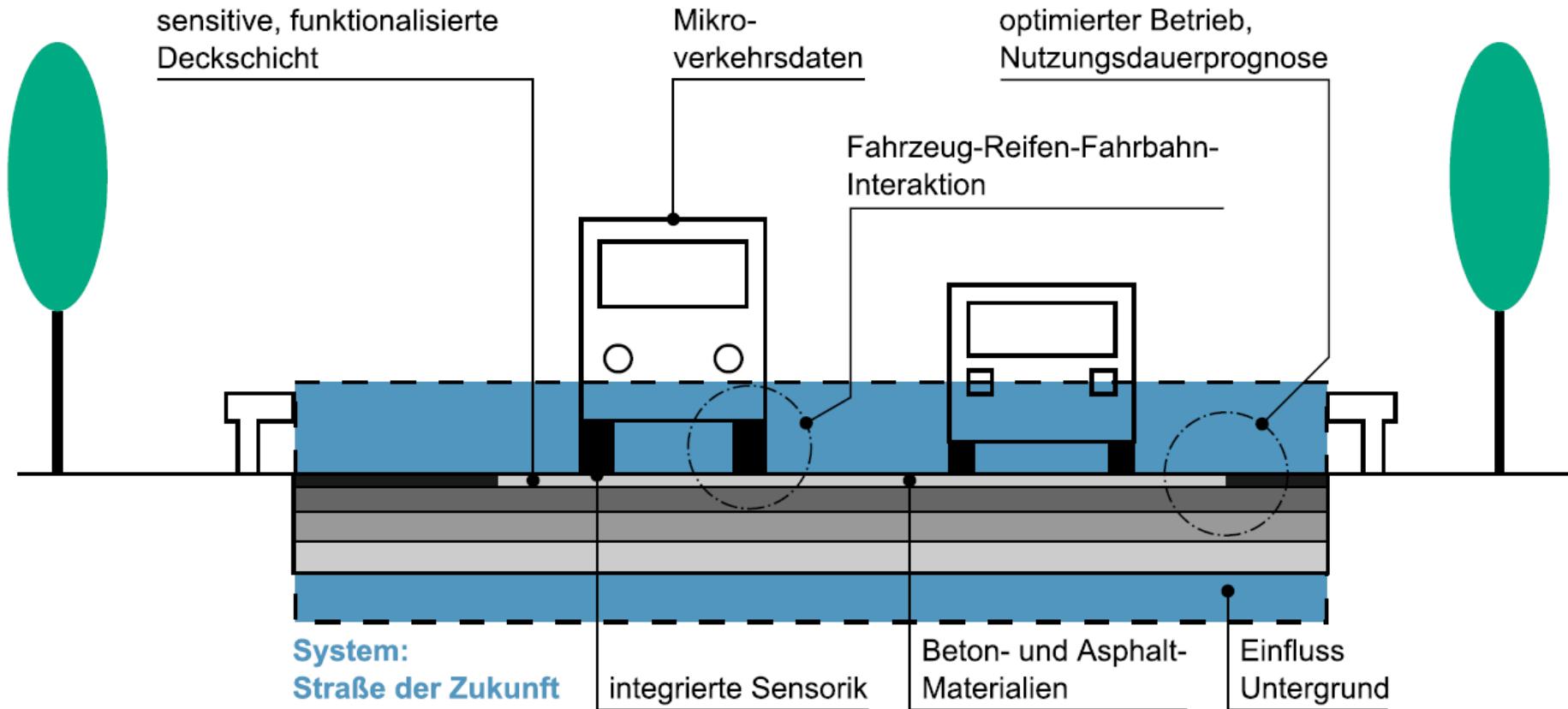
## Grundidee



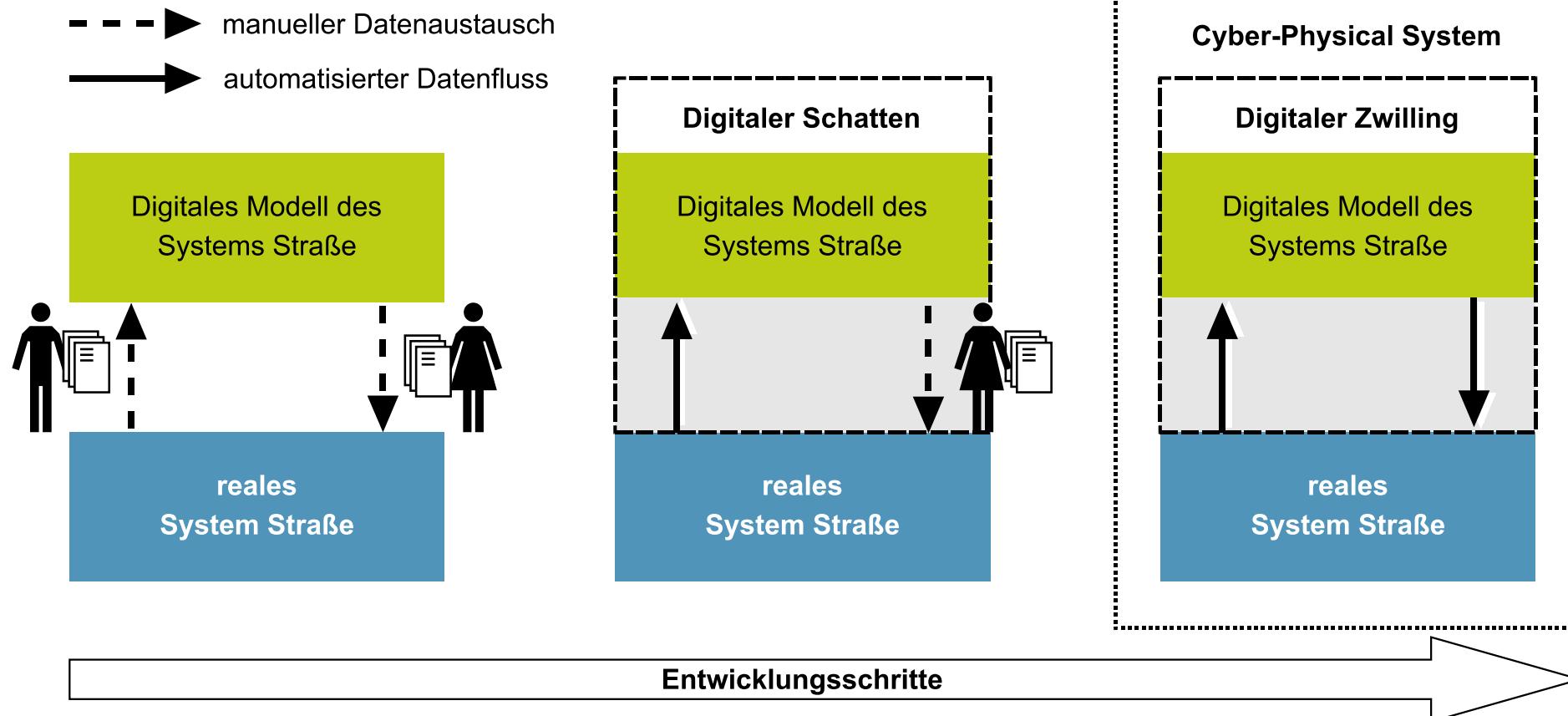
### Kernziele

- ▶ Schaffung der methodische Grundlagen für die Realisierung eines Digitalen Zwilling „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

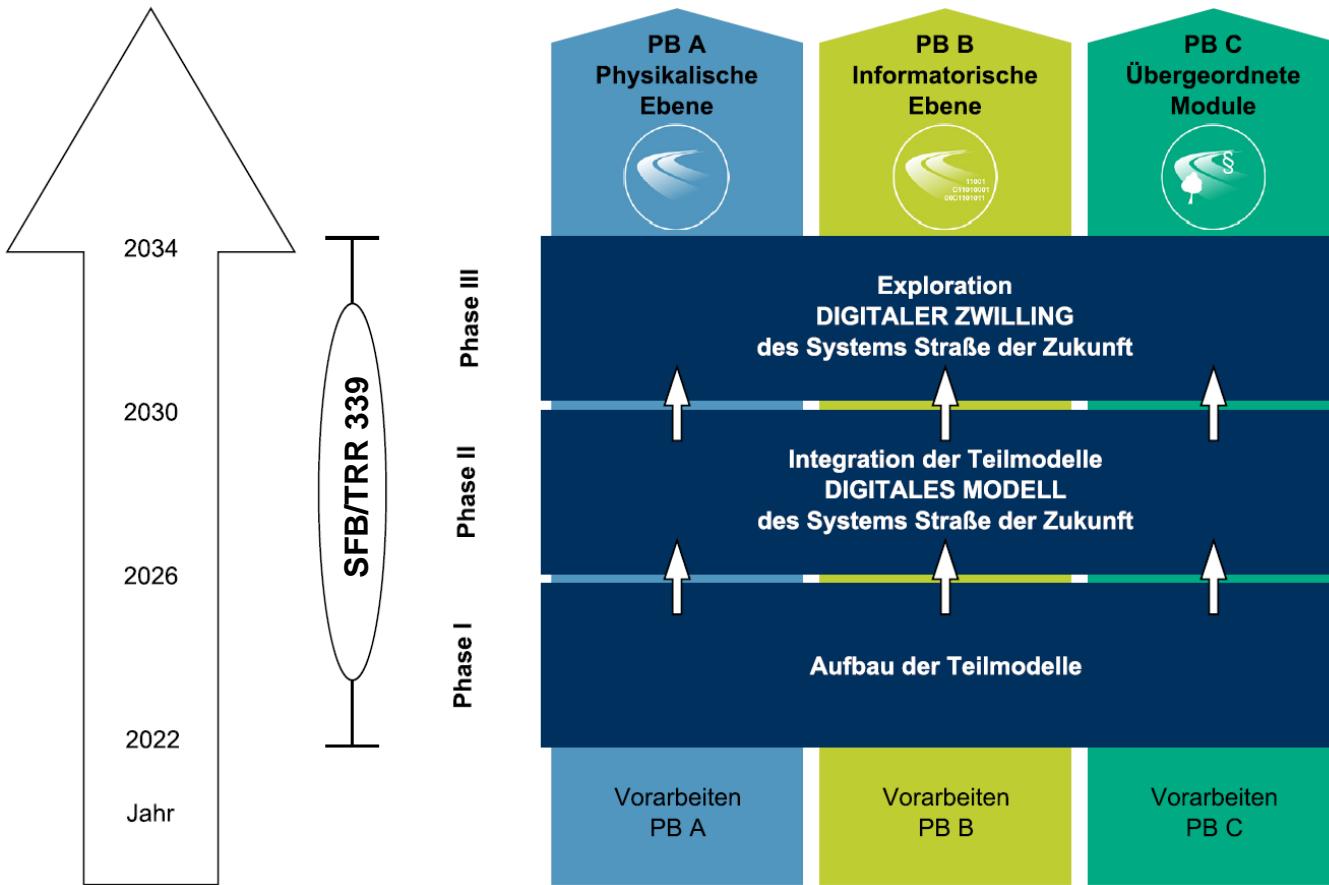
## Betrachtungsgegenstand – bautechnische Sicht



## Entwicklungsschritte



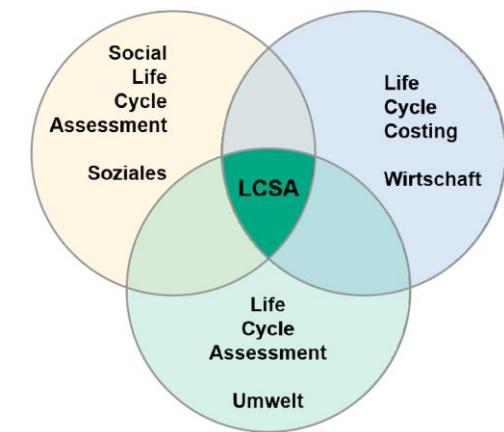
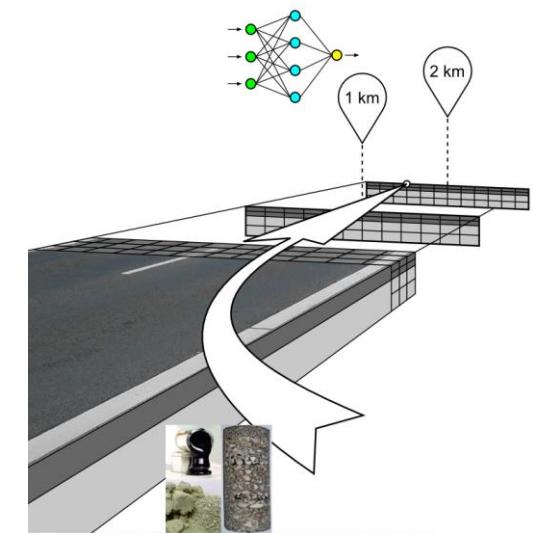
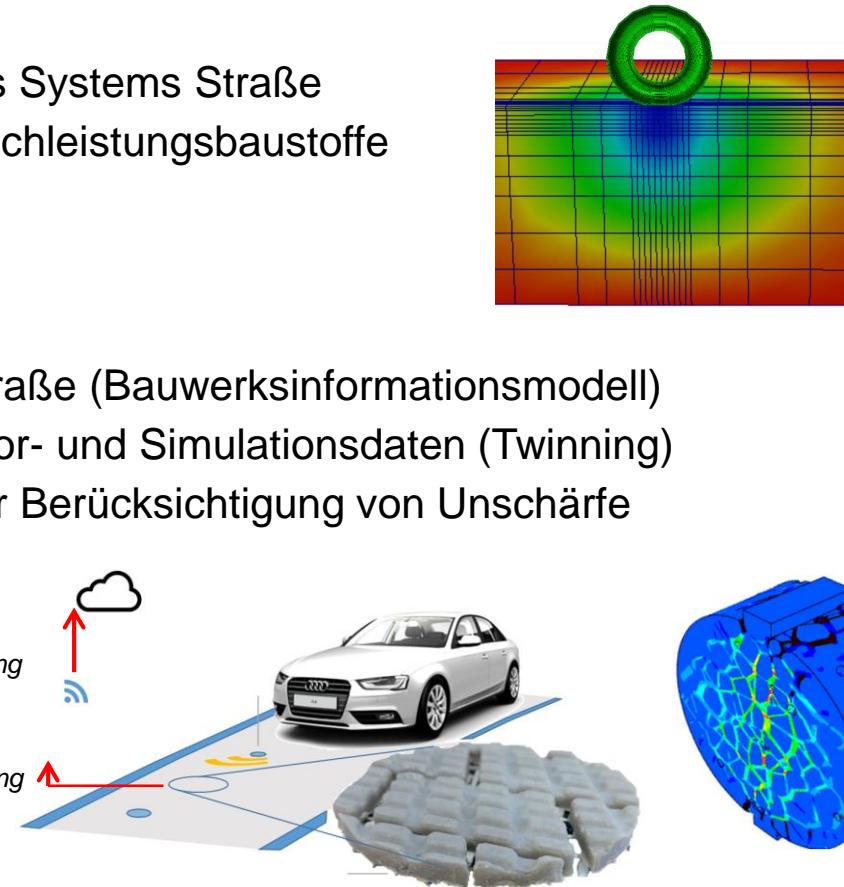
## Entwicklungsstufen / Reifegrade



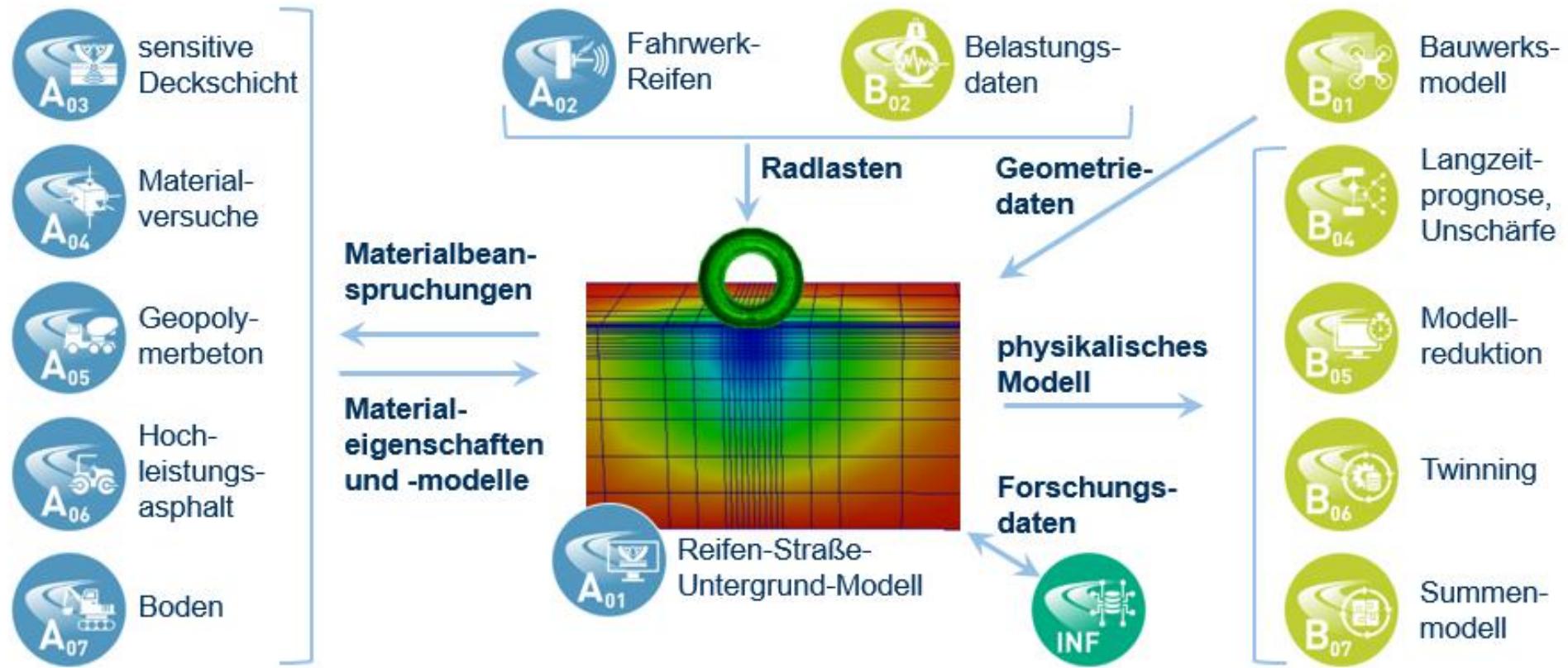
# Multi-LOD Datenmodell

## 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 A<sub>01</sub>

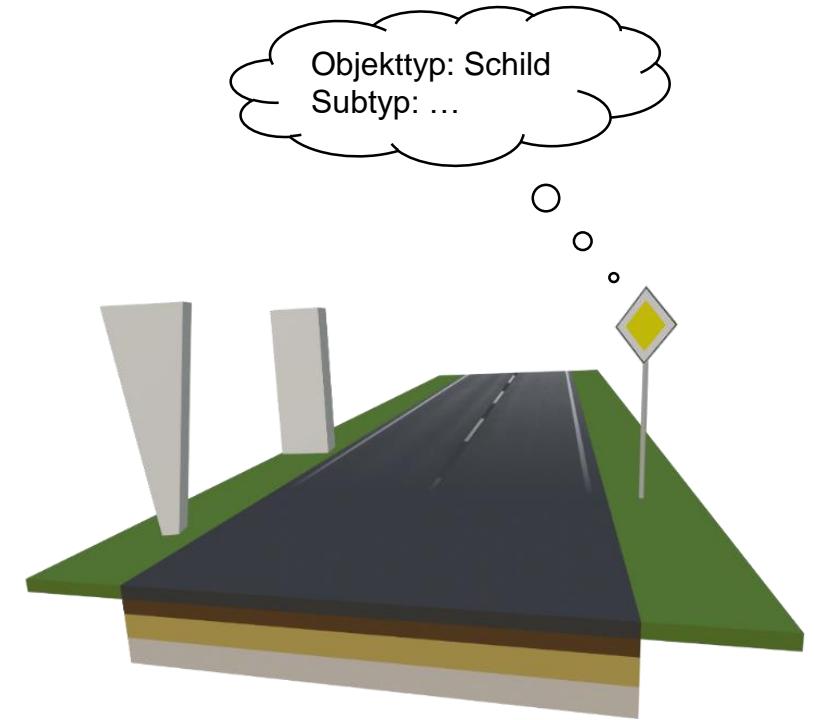


# Geodätische Aspekte im SFB/TRR 339

---

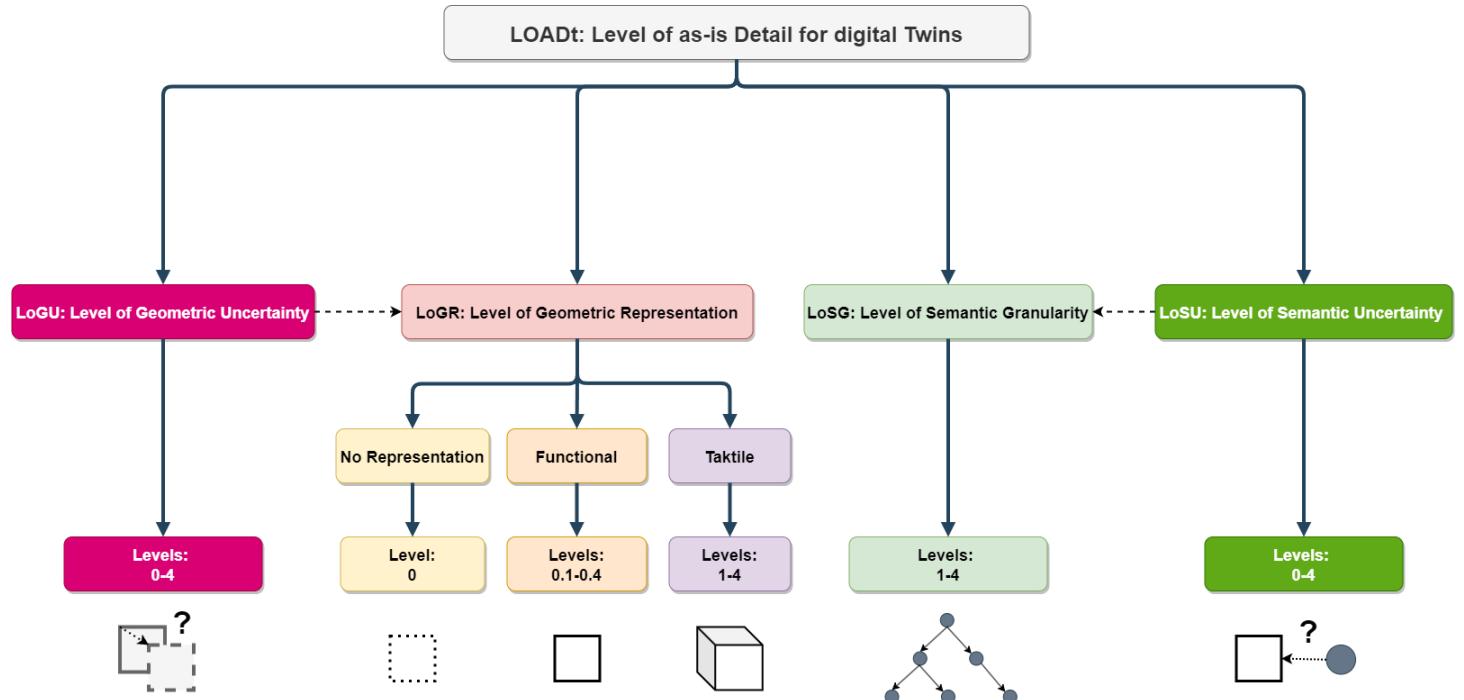
## Geometrisch-semantisches multi-LOD as-is Bauwerksmodell

- 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 Zwilligen 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



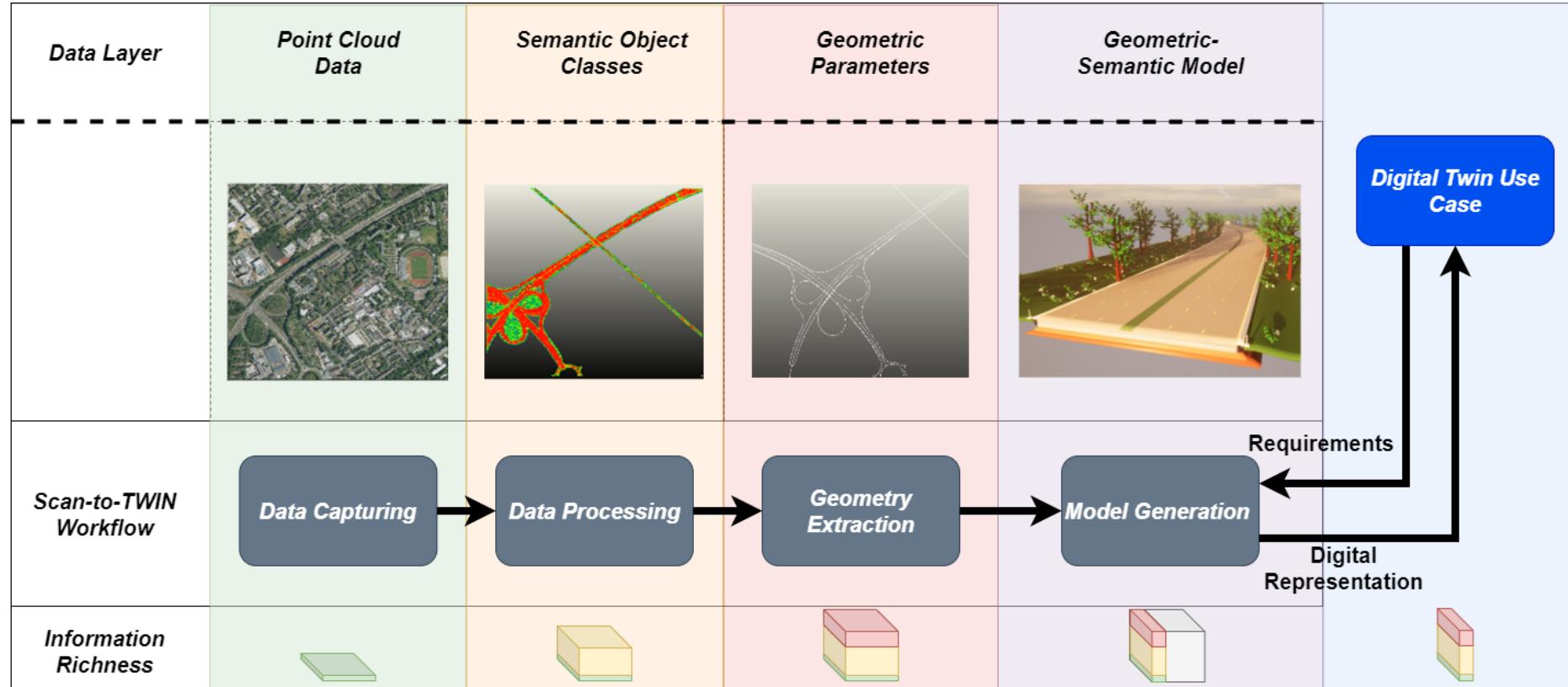
## Konzept zur Strukturierung unterschiedlicher Digitaler Modelle für Digitale Zwillinge

- 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



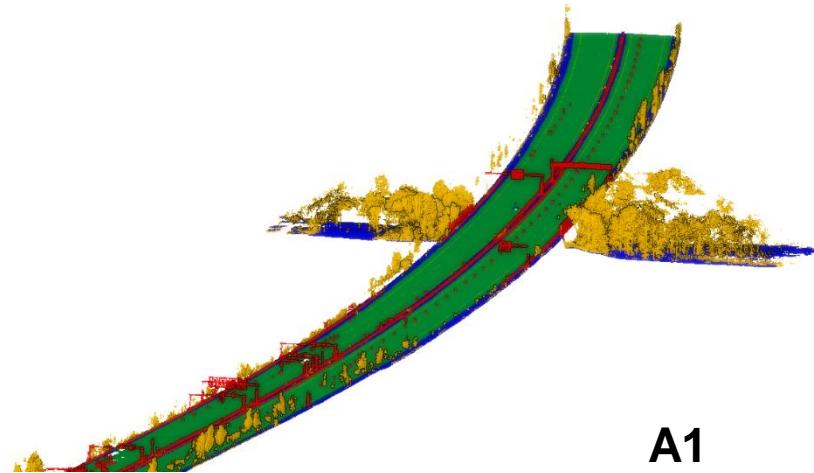
Crampen, D., Hein, M., Blankenbach, J. (2024): A Level of As-Is Detail Concept for Digital Twins of Roads—A Case Study. In: Kolbe, T.H., Donaubauer, A., Beil, C. (eds): Recent Advances in 3D Geoinformation Science. 3DGeoInfo 2023. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43699-4\\_31](https://doi.org/10.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

## Pipeline von der Datenerfassung zum geometrisch-semantischen 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.

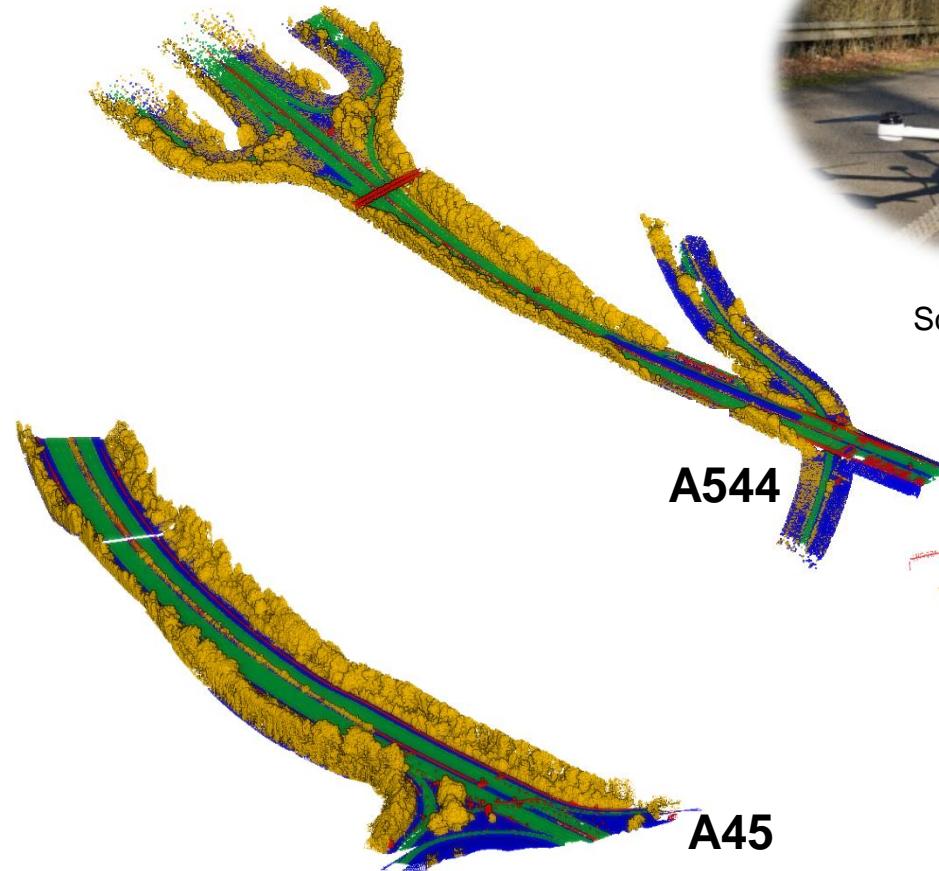
## Messkampagnen auf gesperrten Autobahnabschnitten



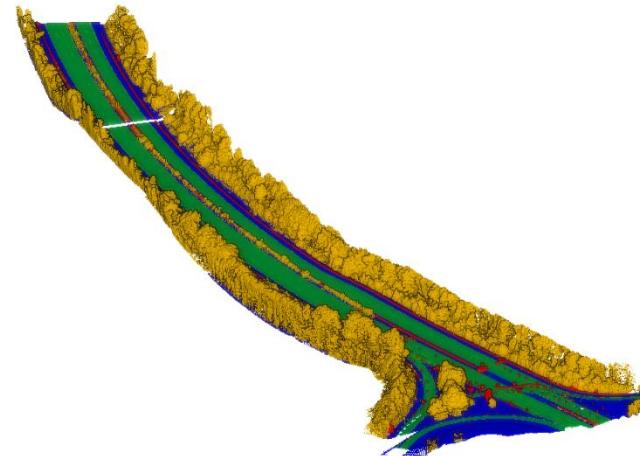
A1



A1



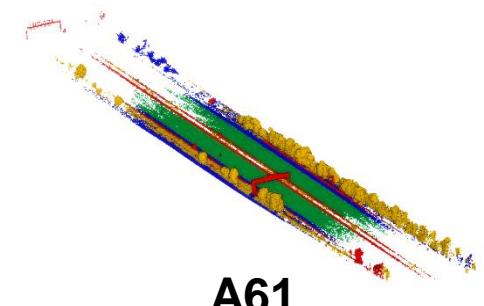
A544



A45



Scanner: Riegl miniVUX-3UAV



A61

# Semantische Segmentierung

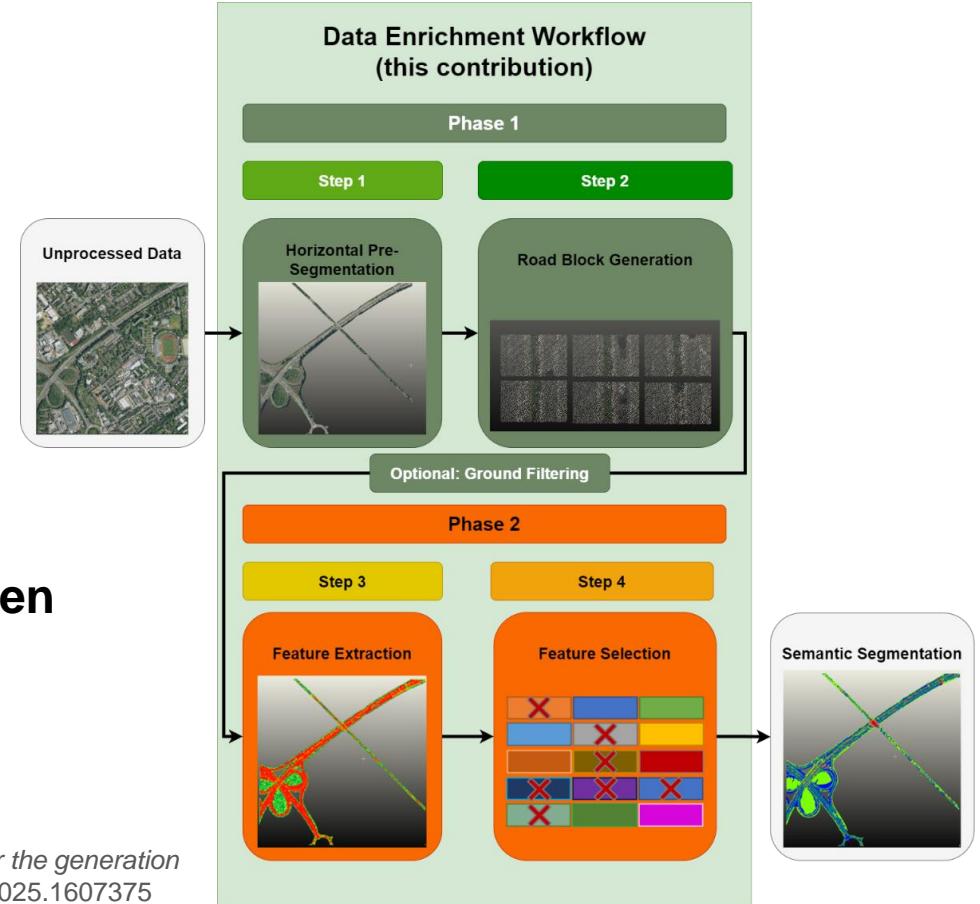
## Geodaten & Vorwissen zur Optimierung von Machine Learning-Verfahren

- 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



# Synthetische Punktwolken

## Erweiterung des Datensatzes für semantische Segmentierung & Geometrieregression

- Prozess zur Erzeugung synthetischer Datensätze aus:
  - Punktfolge
  - Klassenweiser Annotationen
  - 3D-Modell
  - 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



# Synthetische Punktwolken

## Erweiterung des Datensatzes für semantische Segmentierung & Geometrieregression



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

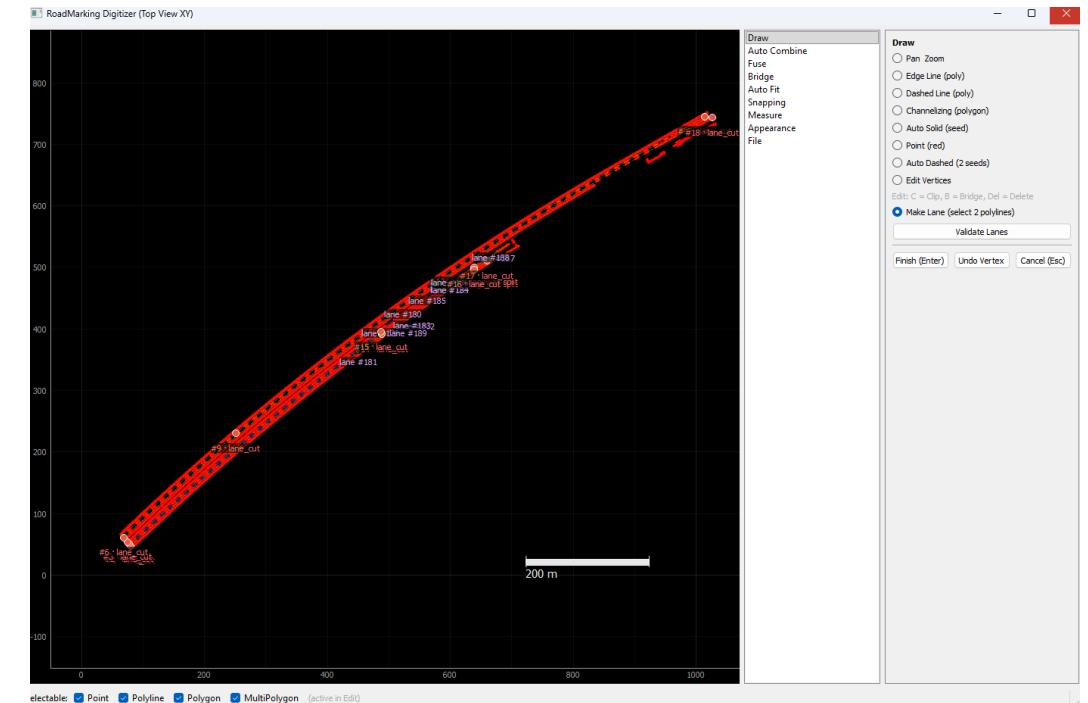


Automatisch erzeugter Straßenkorridor im Lanelet2-Format  
auf Basis einer segmentierten Punktfolge

## 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:

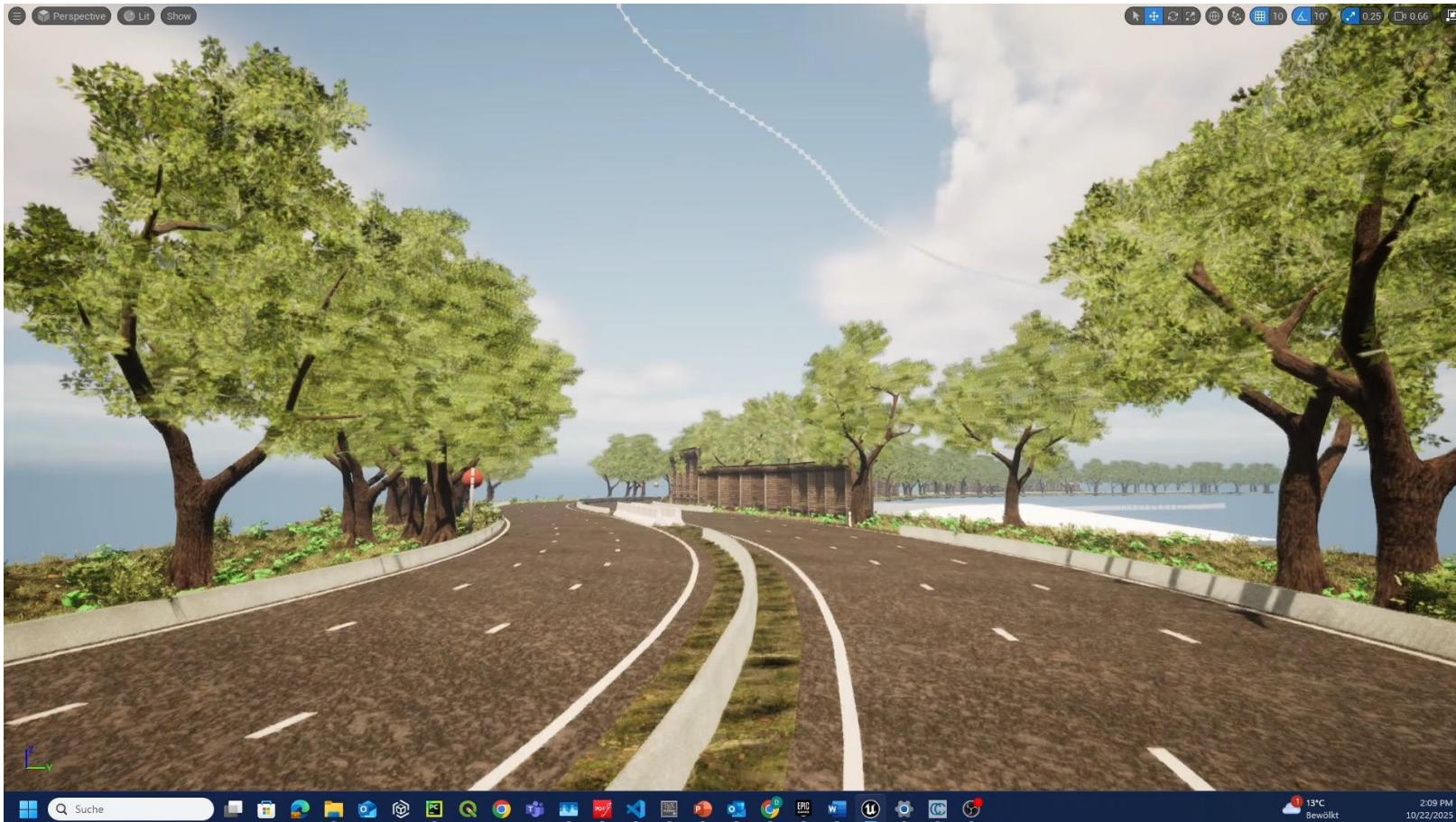
- **Regelbasierte automatische Extraktion** der Mittelachsen, Fahrbahnbegrenzungen etc. zur Definition des Straßenkorridors
- Zusätzliches interaktives Tool zur **semi-automatischen Extraktion** der Straßengeometrie
- **Deep Learning-Modell** zur robusten, vollautomatischen **datengetriebenen Geometrieextraktion**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



Automatische Extraktion von Fahrspurgeometrien

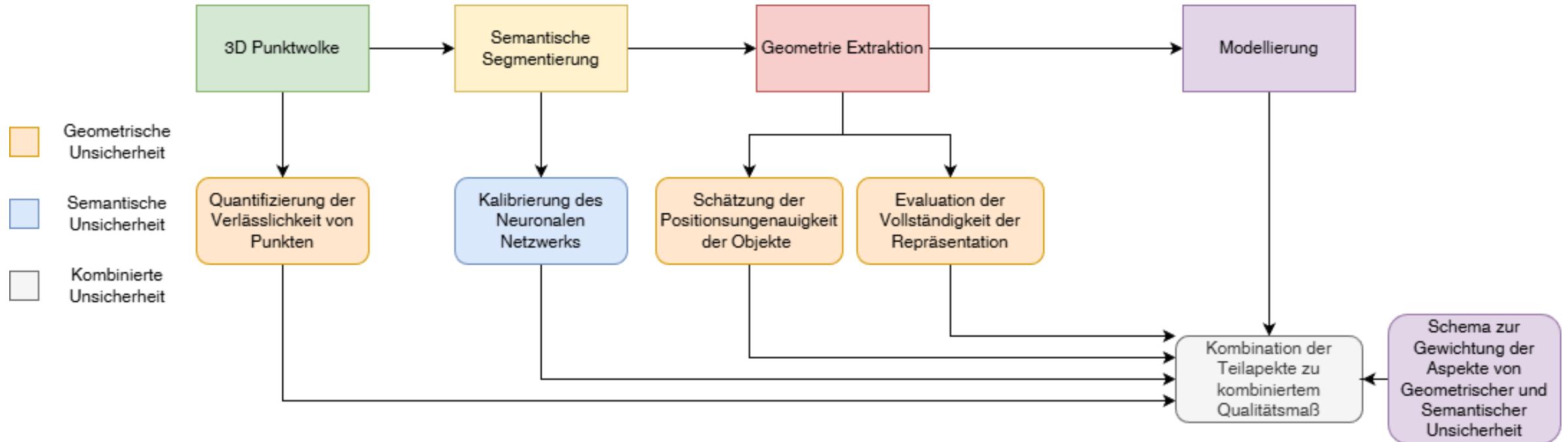
# Geometrisch-semantisches as-is Modell

## Beispiele erzeugter 3D-GSM funktionalisierbar in Game Engines



# Geometrisch-semantisches as-is Modell

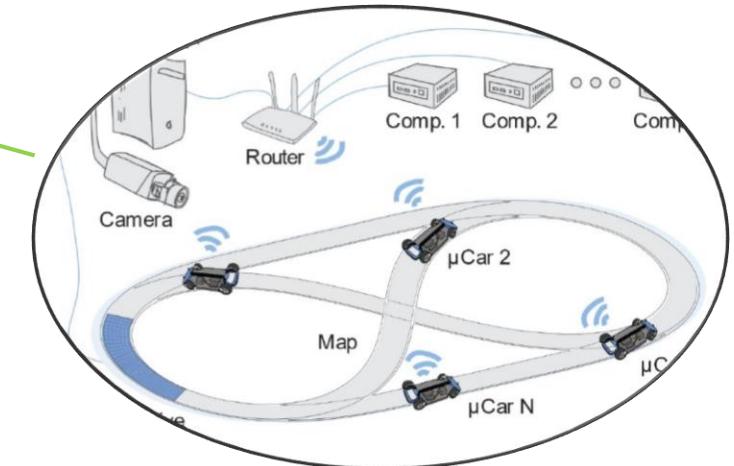
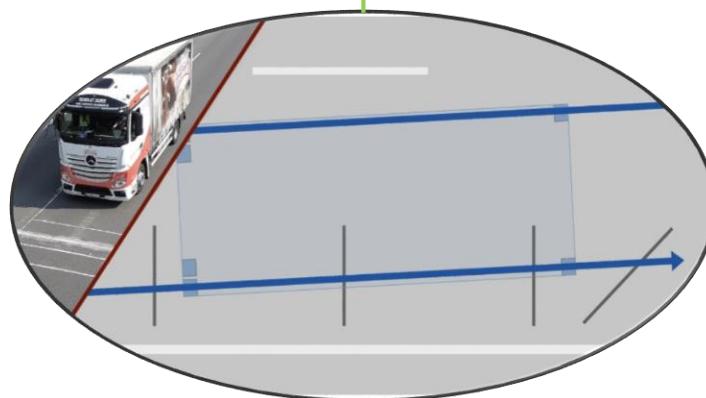
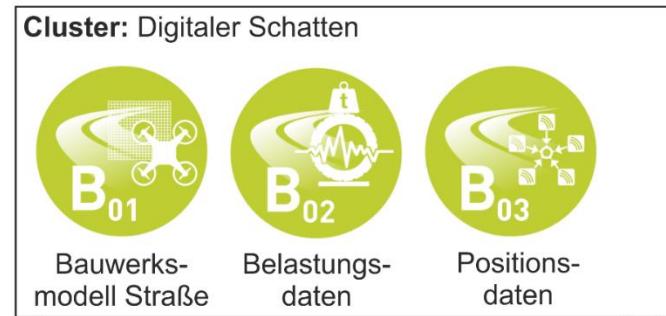
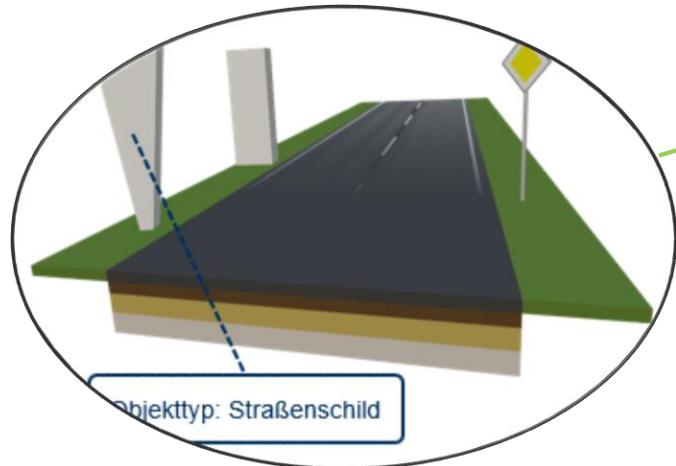
## Unsicherheitsquantifizierung (work in progress)



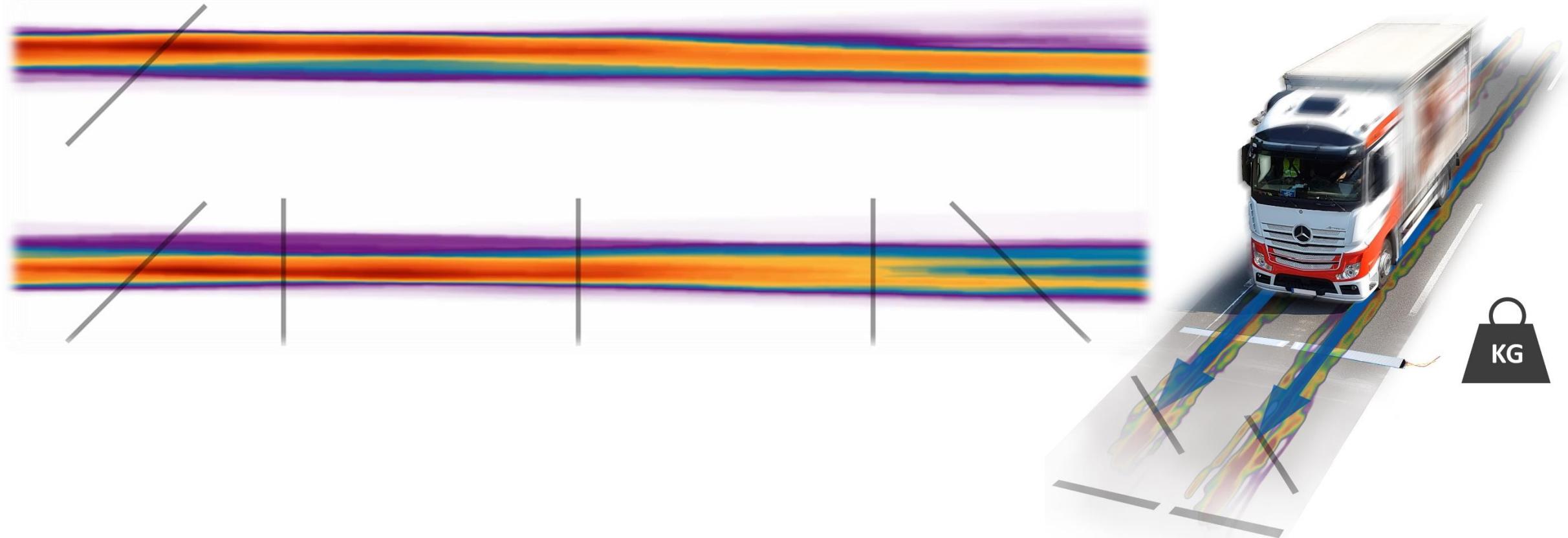
# Showcase „Digitaler Schatten“

---

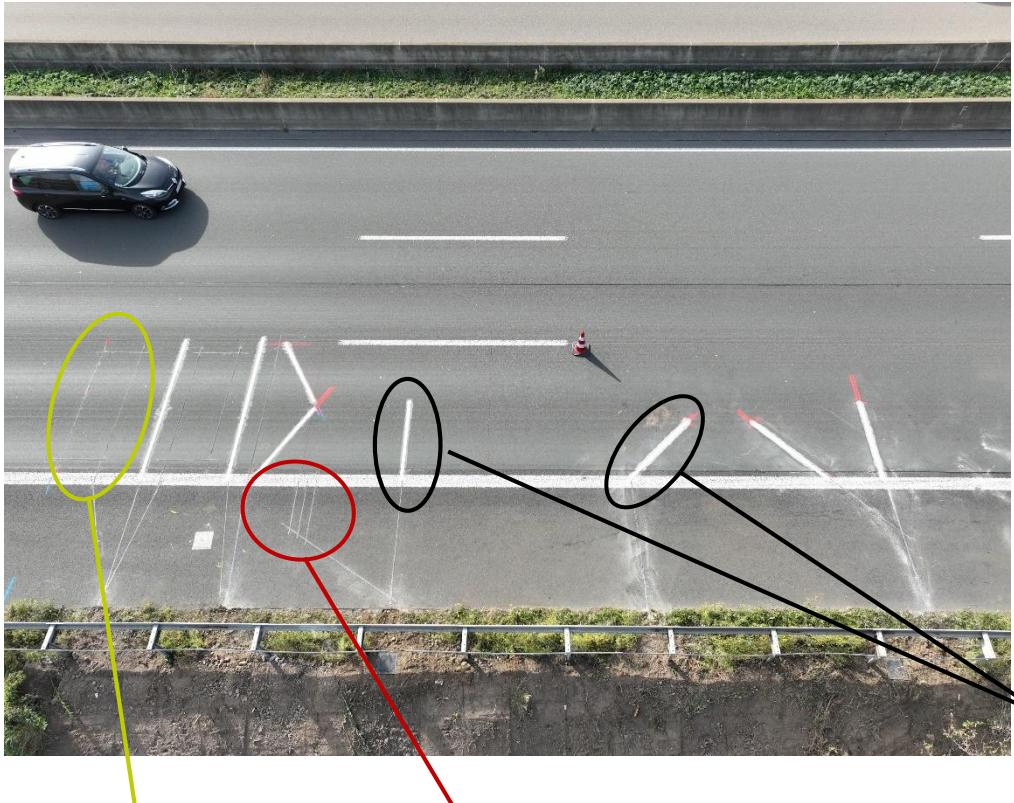
## Showcase „Digitaler Schatten“ – BIM, GIM und IoT



## Virtueller räumlicher Lasteintrag in die Straßeninfrastruktur



## Lasteneintrag am realen Bauwerk – Weigh-in-Motion



### Wind

- Richtung
- Geschwindigkeit

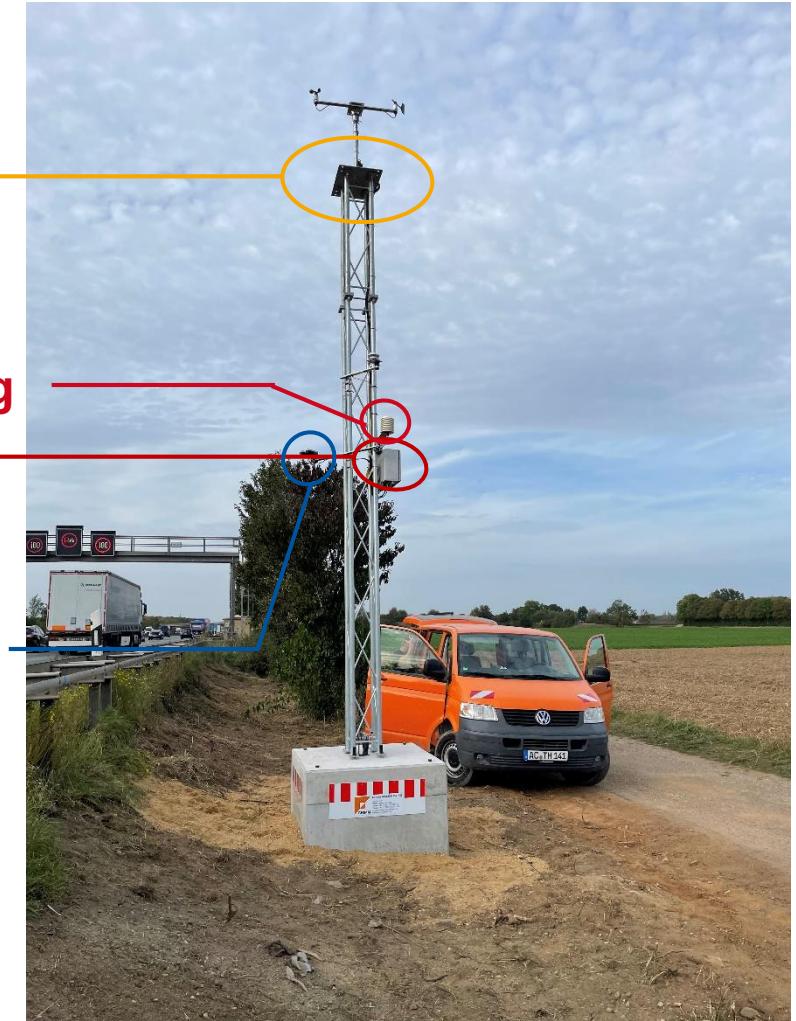
### Sonneneinstrahlung

### (Luft) Temperatur & Feuchtigkeit

### Regen (ja/nein)

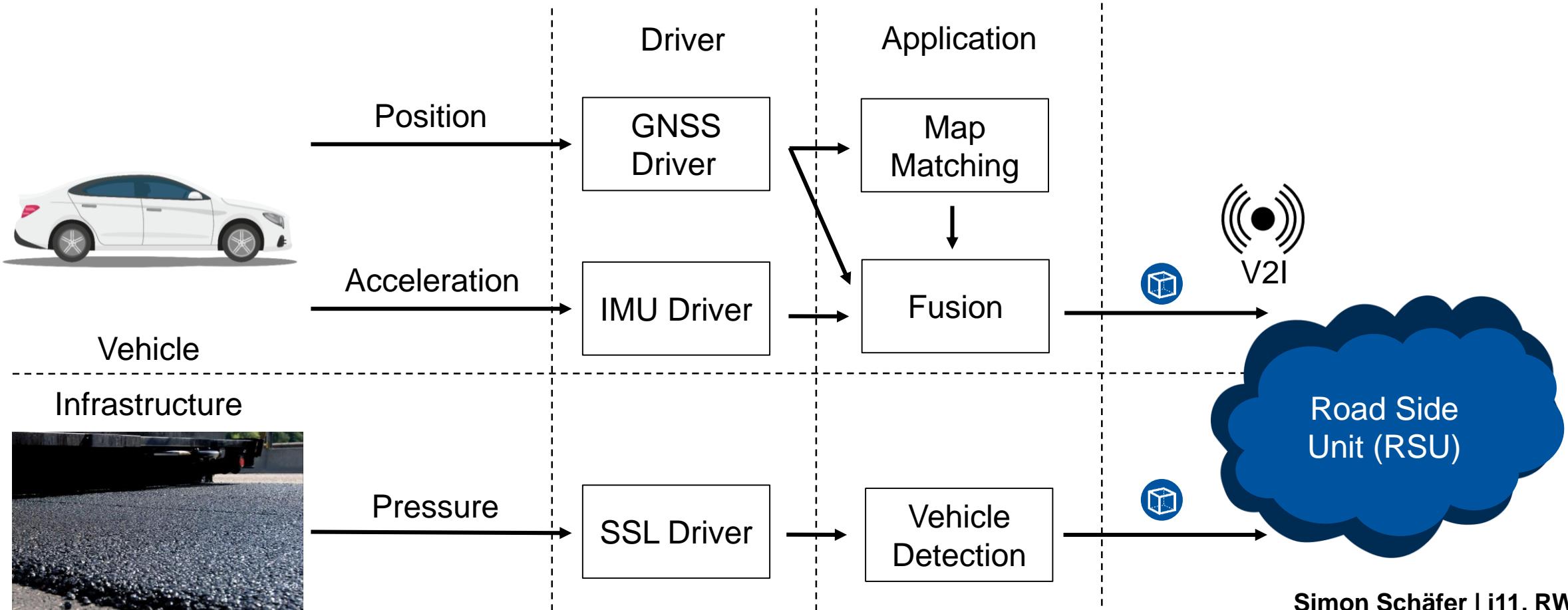
### 10 digitale WIM-Sensoren

- 4 schräg verbaut

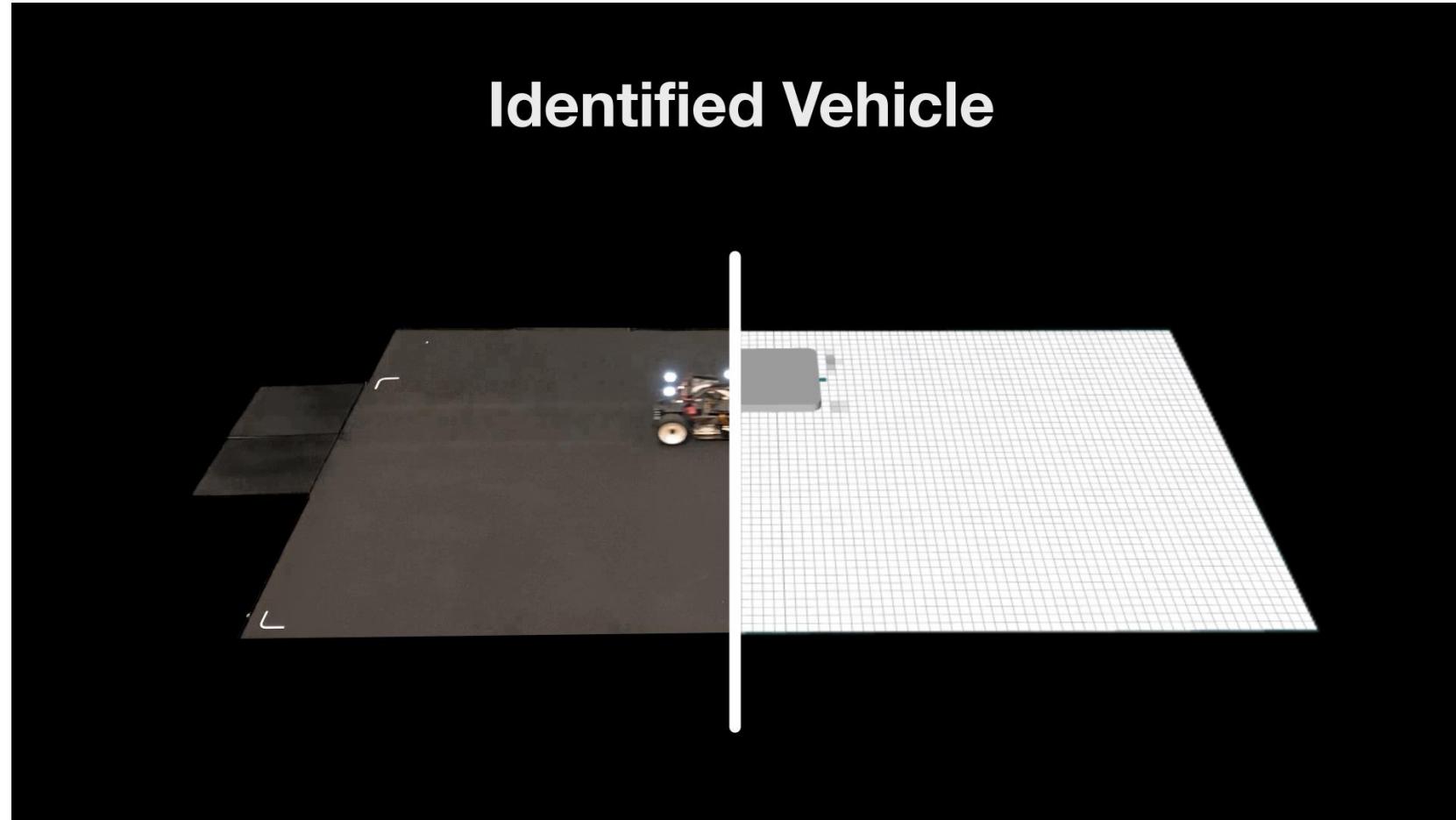


Moritz Hagmanns | isac, RWTH

## Präzise Ermittlung und Vorhersage der Reifenposition



## Präzise Ermittlung und Vorhersage der Reifenposition



Simon Schäfer | i11, RWTH

## Geometrisch-semantisches as-is Modell des Autobahnabschnitts

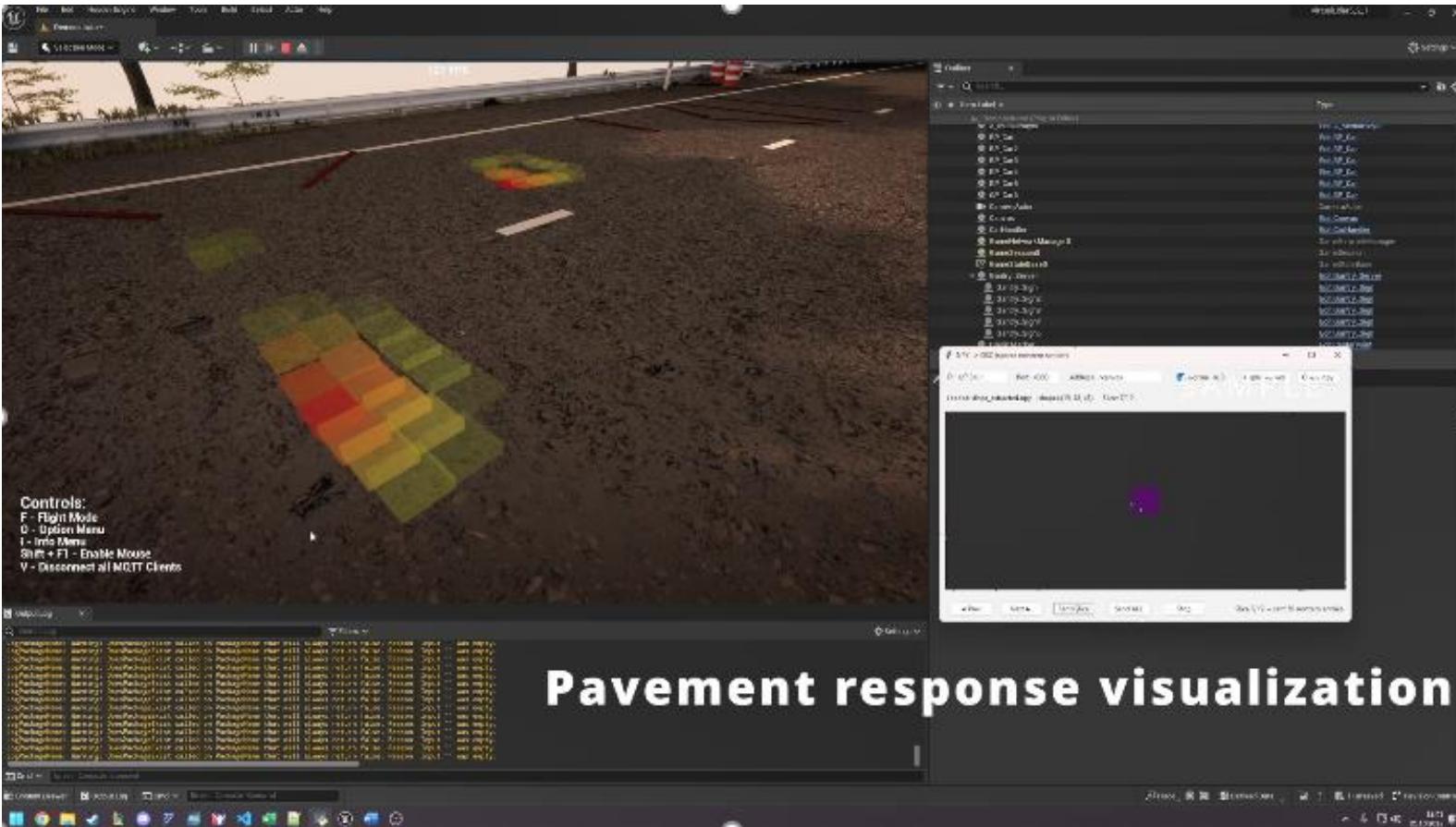


David Crampen | gia, RWTH

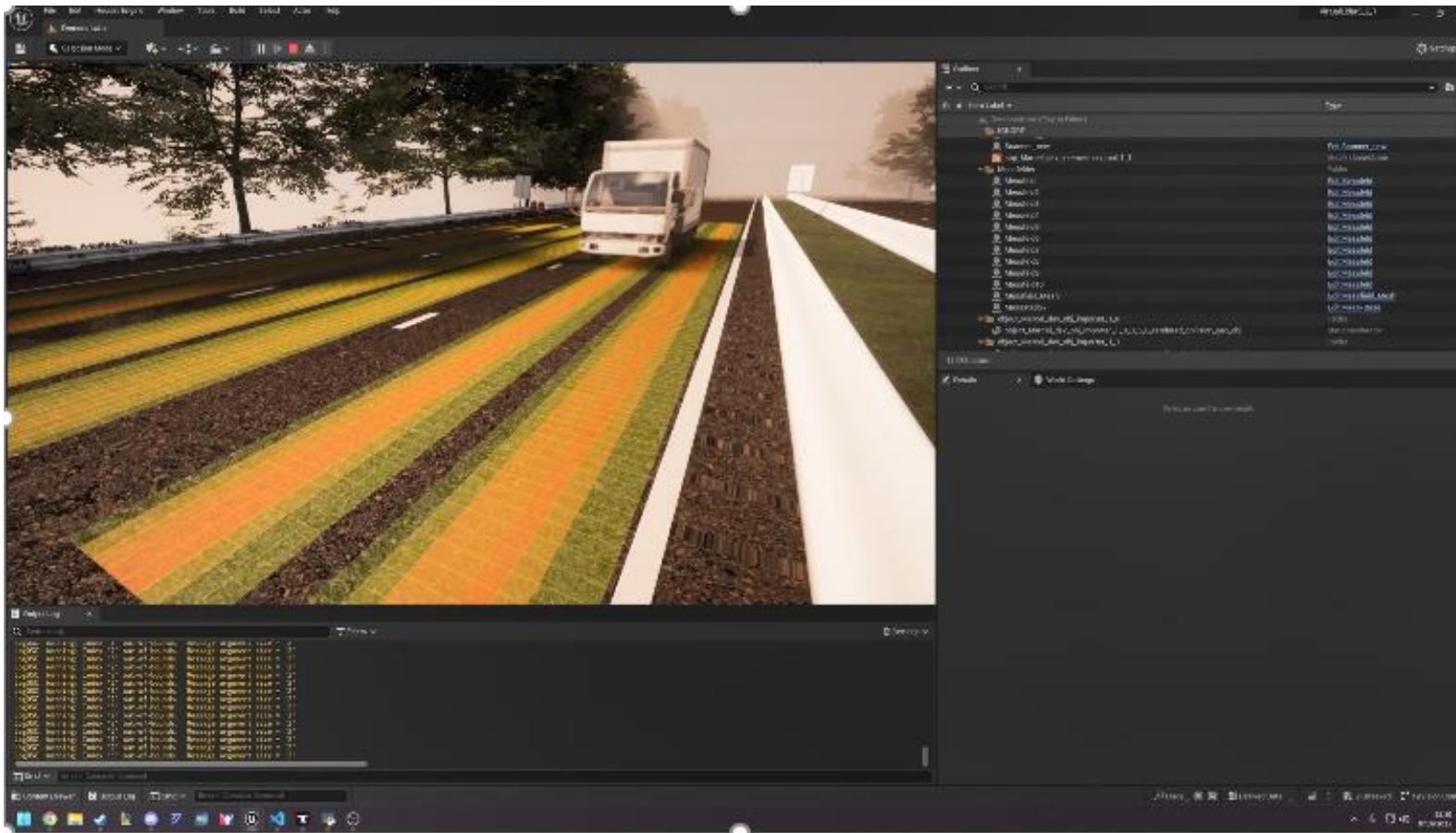
## Showcase „Digitaler Schatten“



## 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