

Automatisierte Trajektorien-Fusion in Multikamerasyystemen zum Verkehrsmanagement

Diplomarbeit



Bearbeitung:

Sebastian Gerken
geboren am 01.09.2000 in Taipei
Studiengang Verkehringenieurwesen

Betreuung:

Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike Dipl.-Ing. Armin Kollascheck
Dipl.-Ing. Michael Heilig (platomo GmbH)

Zeitraum:

26.05.2025 bis 26.10.2025

Motivation & Zielstellung

Ausgangslage & Problem: Hochauflöste Trajektoriendaten sind die Basis für modernes Verkehrsmanagement. Das **OpenTrafficCam (OTC)**-Ökosystem bietet hierfür einen flexiblen Open-Source-Workflow. In komplexen Anwendungsfällen stoßen monokulare Ansätze jedoch an physikalische Grenzen: Verdeckungen (Occlusion) durch Schwerverkehr oder witterungsbedingte Linsenverunreinigungen führen zu bedeutenden Datenlücken. Bisher mangelt es an offenen, transparenten Verfahren, die diese Defizite ohne teure Spezialhardware ausgleichen.

Ziel der Arbeit: Schließung dieser Lücke durch die Entwicklung eines OTC-kompatiblen Multikamera-Fusionsmoduls, das die Erfassungsqualität durch Redundanz maximiert.

- **Methodik:** Implementierung eines *Geometrie-first*-Ansatzes, der 2D-Detektionen via planare Projektion ($Z = 0$) in metrische Weltkoordinaten überführt.
- **Kern:** Nutzung physikalischer Fahrzeug-Footprints statt einfacher Schwerpunkte für eine perspektivenunabhängige Assoziation [1].
- **Ergebnis:** Robuste, lückenlose Trajektorien und stromfein aufgelöste Verkehrsstärken, selbst bei Ausfall einzelner Sichtlinien.

Methodik

Dieser Abschnitt beschreibt die Transformationspipeline von rohen Bilddaten zu verkehrsanalytischen Kennwerten. Der Fokus liegt auf geometrischer Konsistenz im Weltkoordinatensystem.

1. Geometrisches Fundament & Stabilisierung: Grundlage der Fusion ist die präzise Überführung des Bildraums in die physikalische Welt.

- **Kalibrierung:** Intrinsik via Pinhole-Modell. Die Extrinsik wurde mittels PnP-Iterative mit RANSAC aus LiDAR-gestützten Bodenpasspunkten und Bildkorrespondenzen robust geschätzt.
- **Weltprojektion:** Transformation aller Bildpunkte in ein metrisches Koordinatensystem (UTM). Als robuste Vereinfachung für den Knotenpunktbereich dient die Planaritätsannahme ($Z = 0$).
- **Pre-Filtering:** Ein lokaler Unscented Kalman Filter (UKF) je Kamera glättet Jitter vor der Fusion und stabilisiert das Heading für eine zuverlässige "Standing Vehicle Detection".

2. Footprints & Assoziation: *Fusion physikalischer Flächen statt simpler Schwerpunkte.*

- **Footprint-Schätzung:** Rekonstruktion der Fahrzeug-Grundfläche (nach [1]) auf $Z = 0$ aus projizierten 2D-Box-Kanten und RBSV-Standardmaßen. Dies schafft eine perspektivenirrelevante Repräsentation.
- **Greedy-Zuordnung:** Assoziation über eine gewichtete Kostenfunktion über ein Zeitfenster:
 - Footprint-Overlap (Intersection over Union) als Hauptfaktor.
 - Euklidische Distanz & Heading-Differenz
 - Geschwindigkeit und Beschleunigung
- **Globale Fusion:** Ein zentraler globaler UKF mit Constant Turn Rate Modell fusioniert die Zustände und schreibt Trajektorien bei Verdeckungen physikalisch plausible fort.

[1] Chen, Y., Liu, F., Pei, K.: *Monocular Vehicle 3D Bounding Box Estimation Using Homography and Geometry in Traffic Scene*. ICASSP 2022. DOI: 10.1109/ICASSP43922.2022.9747512.

3. Analyse: Vom Track zum Strom: Verkehrswissenschaftliche Auswertung im Weltkoordinatensystem.

- **Geo-Sections:** Definition virtueller Detektorlinien direkt in Weltkoordinaten.
- **Flow-Events:** Schneidet eine Trajektorie Start- und Ziel-Sections, kann eine Fahrzeubewegung registriert werden.
- **Ergebnis:** Automatisierte, stromfeine Zählungen.

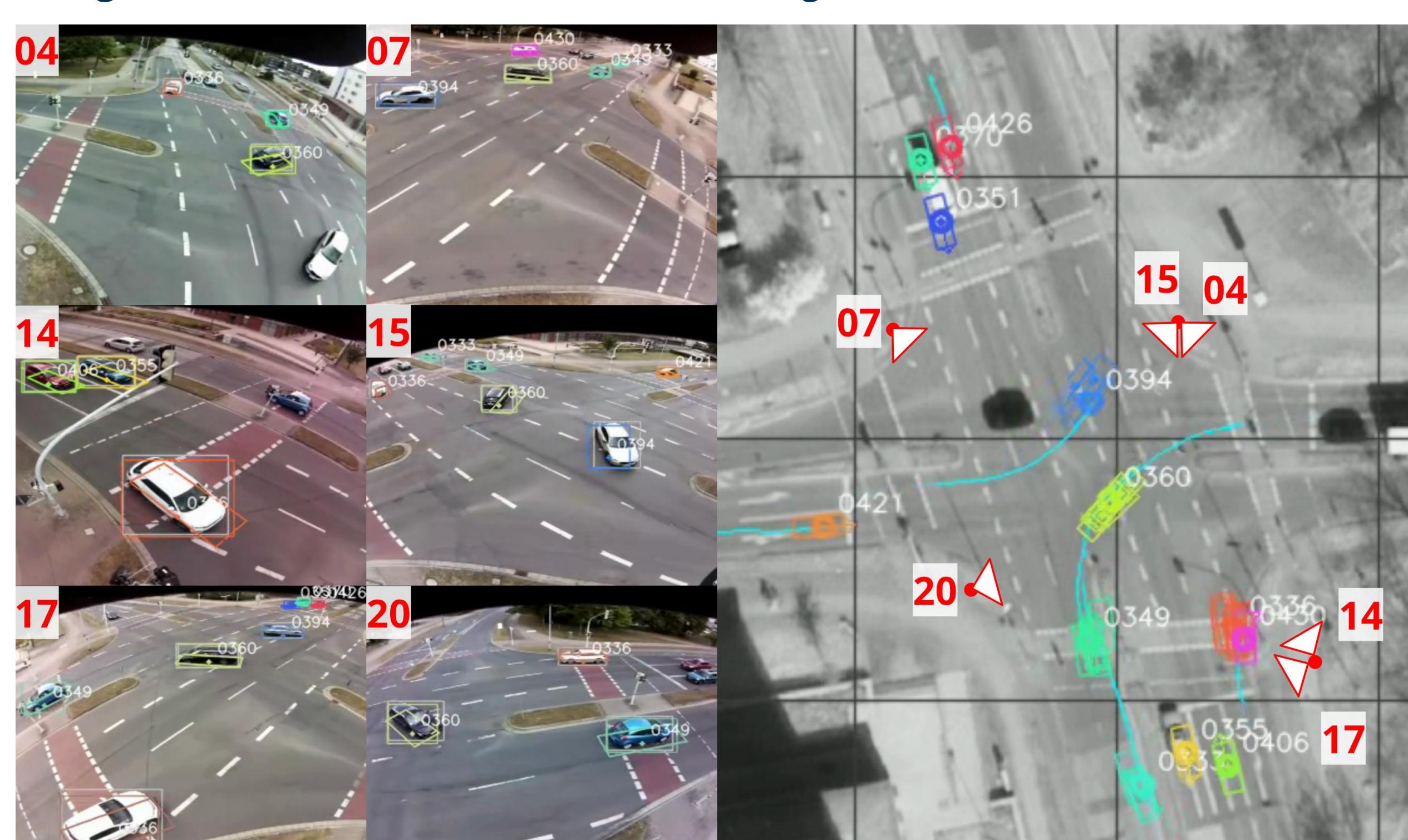


Abb. 2: Live-Fusion im Reallabor: Die Bird's-Eye-View (rechts) zeigt konsistente Trajektorien über den gesamten Knotenpunkt, generiert aus den fragmentierten Sichtfeldern der Einzelkameras (links).

Ergebnisse & Validierung

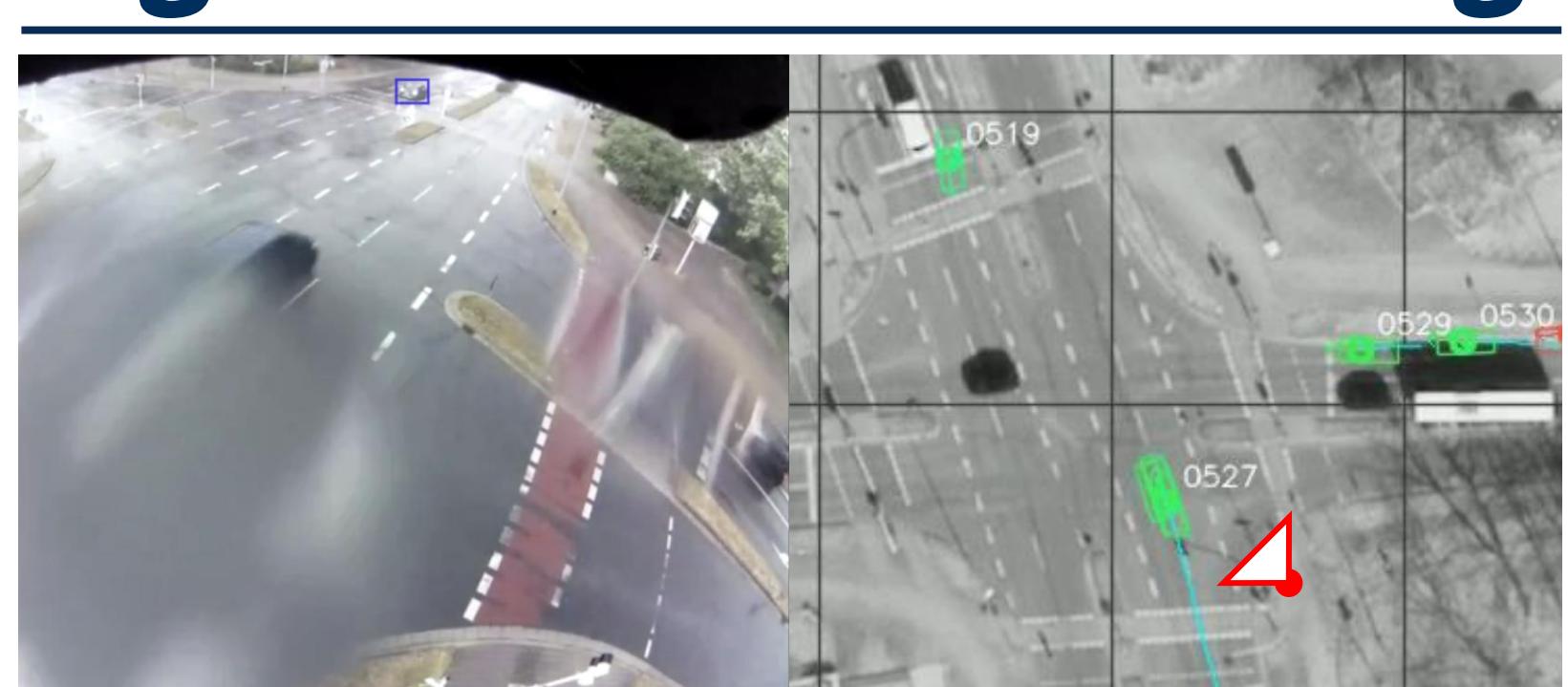


Abb. 3: Die Trajektorien-Fusion ermöglicht es auch verdeckte Fahrzeuge zu erkennen. Einzelkamera (links), Multikamera-Trajektorienfusion (rechts).

Die Validierung erfolgte über manuell erhobenen Ground-Truth-Daten auf Verkehrsstromebene an einem Knotenpunkt in Hoyerswerda. Für den Ground-Truth-Datensatz ergab die Validierung einen WPAE¹ von nur $\approx 3,82\%$ verglichen mit $\approx 7,31\%$ für eine einzelne Kamera. Aufgrund der begrenzten Feldstudie (vier 15-Minuten-Intervalle) reicht die Aussage nur für einen ersten Blick für das Potenzial dieser Methodik.

- Der entscheidende Mehrwert der Fusion ist die Zuverlässigkeit unter erschwerten Bedingungen:
- Die Einzelkamera zeigt unter Regen mit Linsenverunreinigung Untererfassungsraten von bis zu 36%.
 - Die Multikamera-Fusion kompensiert die Sichtausfälle durch geometrische Redundanz. Die Zählgenaugkeit bleibt unverändert auf dem Niveau der Normalbedingungen.

Insgesamt zeigt die Validierung das Potential von Multikamerasytemen. Die Trajektorien-Fusion liefert eine robuste Datenbasis, die selbst dort präzise Verkehrsstromereignisse generiert, wo Einzelkamerasyteme aufgrund physikalischer Grenzen versagen.

¹ Weighted Average Percentage Error