

Automatische Auswertung von Überholvorgängen aus Luftbildaufnahmen mit dem UAS HORUS

Dipl.-Ing Tom Hößler, Dipl.-Ing. Lucas Günther, Dr.-Ing. Frank Steinert

Kurzfassung: Unfälle im Verlauf von Überholvorgängen auf Landstraßen sind durch eine besonders hohe Unfallschwere gekennzeichnet. Daher sollte stets im Einzelfall geprüft werden, wo das Befahren des Gegenverkehrsfahrbahnbereichs aus Verkehrssicherheitsgründen nicht zugelassen werden kann. Dabei spielt die Mindestüberholweite eine wichtige Rolle. Die Ermittlung dieser Größe erfolgt auf der Grundlage eines Überholmodells, welches derzeit weitgehend auf Untersuchungen aus den 1980er Jahren basiert. Die darin verwendeten Eingangsgrößen sind jedoch aufgrund der zwischenzeitlichen Fahrzeugentwicklung nicht mehr aktuell. Aus diesem Grund wird anhand von geometrischen und fahrzeugtechnischen Eingangsparametern ein aktualisiertes Überholmodell in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen entwickelt. Die für die Erstellung des Überholmodells notwendigen Daten werden mithilfe dem ferngesteuerten UAS HORUS erfasst.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine automatisierte Auswertung der aufgenommenen Luftbildsequenzen realisiert, die die Trajektorien der Fahrzeuge insbesondere während Überholvorgängen liefert. Um die abgebildeten Fahrzeuge in den Einzelbildern zu erkennen und deren Positionen bestimmen zu können, kommen Methoden der Photogrammetrie und Bildverarbeitung zum Einsatz. Die Kalibrierung der Messkamera ermöglichte die Transformation der Bildkoordinaten in Weltkoordinaten. Dabei wurde ein Modell des vollständigen Abbildungsvorganges formuliert und die Messunsicherheiten der Ergebnisgrößen untersucht.

Das verwendete Messsystem und die entwickelten Algorithmen können für weitere Untersuchungen wie beispielsweise in gefährlichen Kreuzungsbereichen oder großen Verkehrsknotenpunkten eingesetzt werden

Abstract: Accidents in the course of overtaking manoeuvres on rural roads are characterized by a particularly high severity. Therefore, it has to be decided where driving on the oncoming traffic lane can not be allowed due to traffic safety. In this context, the overtaking sight distance is an important quantity, which can be derived from a model of overtaking manoeuvres. The current model is largely based on studies from the 1980s. The used input variables are obsolete because of the recent development of vehicles. For this reason, an updated model of overtaking maneuvers depending on various boundary conditions is developed. The model is based on data collected using a hovering remote controlled ultra-light sensor platform (HORUS).

In this project an automated evaluation of the recorded aerial image sequences has been realized, which provides the trajectories of the vehicles especially during overtaking. Methods of photogrammetry and image processing are used to detect the vehicles shown and to determine their position. Camera calibration was necessary in order to transform image coordinates into world coordinates. In this regard, a projection model was formulated and the measurement uncertainties of the output quantities were examined.

The used measuring system and the developed algorithms can be applied to further traffic analysis such as studies of dangerous crossing areas as well as major transport hubs.

1. EINLEITUNG

„Hebt man den Blick, so sieht man keine Grenzen.“ - japanisches Sprichwort -

Diese Lebensweisheit trifft auch auf das Ingenieurwesen zu, denn der Einsatz innovativer Messsysteme kann helfen, bestehende Grenzen zu überwinden. Beispielsweise erlauben sogenannte UAS (Unmanned Aerial Systems) neue Perspektiven für die Erfassung von Messdaten und Bildaufnahmen. Aus diesem Grund wurde am Dresdner Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme in Kooperation mit der Airclip GmbH die schwebende Sensorplattform HORUS („HOvering Remote controlled Ultra-light Sensor platform“) entwickelt.

Eine Anwendung für solch ein UAS ist ein gemeinsames Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen, des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden sowie des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme. Dabei kommt das UAS HORUS zum Einsatz, um Luftbildsequenzen von Überholvorgängen auf Landstraßen aufzunehmen. Die erfassten Daten dienen der Aktualisierung eines Überholmodells, das beispielsweise zur Ermittlung der Mindestüberholstrecke verwendet wird. Daraus lassen sich Empfehlungen ableiten, unter welchen Bedingungen das Überholen verboten werden sollte oder die Anordnung eines Zusatzfahrstreifens sinnvoll ist.

Um die Aktualisierung des Überholmodells zu unterstützen, soll in diesem Projekt ein Algorithmus zur automatischen Auswertung der Luftbildsequenzen vorgestellt werden, der bereits verwendet wird, um die Trajektorien der Fahrzeuge zu ermitteln. Mithilfe von Methoden der Bildverarbeitung werden dabei die erfassten Fahrzeuge erkannt und deren Weltkoordinaten photogrammetrisch bestimmt. Um ein Modell des gesamten Abbildungsvorganges zu formulieren, wird ausgehend von den theoretischen Grundlagen eine geeignete Kamerakalibrierung durchgeführt. Abschließend wird der implementierte Algorithmus anhand exemplarischer Luftbildaufnahmen demonstriert.

2. MESSSYSTEM

Für die Aufzeichnung der Bildsequenzen von Überholvorgängen auf ausgewählten Strecken sind die folgenden Anforderungen für eine erfolgreiche Versuchsdurchführung erfüllt:

- Erfassung von Zeitdauer und zurückgelegter Wegstrecke von allen am Überholvorgang Beteiligten (Überholter, Überholer, Entgegenkommender) sowie daraus abgeleitete Geschwindigkeiten und Beschleunigungen,
- kontinuierliche Aufnahme der Messwerte für alle am Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge,
- Einsehbarkeit großer Abschnittslängen von mindestens 600 m,
- von den Fahrern nicht wahrnehmbare und das Fahrverhalten nicht beeinflussende Messtechnik.

Die Sensorplattform HORUS kann je nach Anforderung mit 4, 8 oder 12 Motoren betrieben werden. Der 1,0 m × 1,3 m große Kopter ist selbstständig in der Lage, eine programmierte Position GPS-gestützt anzufliegen und über die Dauer der Messung zu halten. Die H-förmige Geometrie des Rahmens ermöglicht eine beliebige Anordnung der Nutzlasten bzw. Flugakkus, sowie das schnelle Austauschen verschiedenster Sensorikmodule. *Abbildung 1* zeigt die Oktokoptervariante des HORUS.

Für die Messung wird HORUS mit einem aktiven nick- und rollkompensierten Kameramodul ausgestattet. Die Kamerahalterung gleicht die Nick- und Rollbewegungen des Kopters genau so aus, dass die montierte Kamera während der Messdatenerfassung einen konstanten Aufnahmewinkel hält.



Abbildung 1: Oktokoptervariante des HORUS mit Kameramodul

Als Messstrecken wurden durch das Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden lange Geraden mit großen Sichtweiten zwischen 500 m und 700 m ausgewählt.

Die bisherige Messdatenerfassung fand an 11 Tagen im Zeitraum von Juli bis September 2013 statt, dabei konnten insgesamt über 600 Überholvorgänge aufgezeichnet werden. Weitere Messungen werden im zweiten Quartal 2014 in Bayern durchgeführt.

Aufgrund der Tatsache, dass die maximale Flughöhe des HORUS ca. 250 m beträgt und der zu erfassende Straßenabschnitt von einem Punkt aus dieser Höhe erfasst werden soll, ist ein Objektiv mit geringer Brennweite erforderlich und eine Kalibrierung der Messkamera notwendig. Eine Kalibrierung bezeichnet die Ermittlung der internen und externen Kameraparameter und ermöglicht somit die Transformation der Pixelkoordinaten in die Weltkoordinaten eines abgebildeten Objektes.

3. BESTIMMUNG DER KAMERAPARAMETER

Die Bestimmung der internen Kameraparameter erfolgte am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden in einem Raum, der speziell für die Kalibrierung von Fischaugen-Objektiven eingerichtet wurde. An den Wänden und der Decke befinden sich 140 Messpunkte, deren Objektkoordinaten mit einer Standardabweichung von maximal 0,23 mm bekannt sind. *Abbildung 2* zeigt ein Bild des Kalibrierraums, das von einer Kamera mit Fischaugen-Objektiv aus der Raummitte nach oben aufgenommen wurde. Der vergrößerte Ausschnitt veranschaulicht die Codemarken, die eine automatische Identifikation erlauben. Die externen Kameraparameter definieren die eindeutige Transformation des Objektkoordinatensystems in das Kamerakoordinatensystem und wurden für die Messungen jeweils definiert.

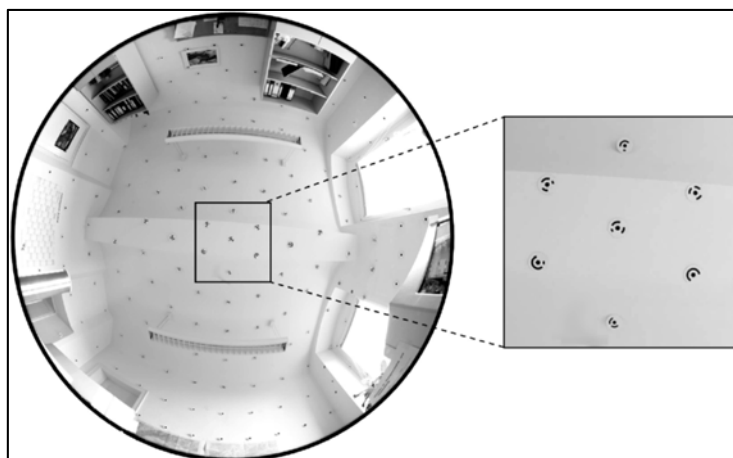


Abbildung 2: Kalibrierraum am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden.

4. ALGORITHMUS ZUR AUTOMATISCHEN AUSWERTUNG VON LUFTBILDERN

Ziel des Vorhabens ist die Implementierung eines Algorithmus, welcher ausgehend von Luftbildern die Positionen von Fahrzeugen im Weltkoordinatensystem ermittelt. Dabei sind Überholvorgänge von besonderem Interesse, denn anhand der ermittelten Fahrzeugtrajektorien wird am Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden ein Modell für das Überholverhalten von PKW-Fahrern erstellt. Die auszuwertende Datenmenge von mehr als 600 Überholsequenzen erfordert eine weitestgehende Automatisierung. Die automatische Auswertung der Luftbilder kann in zwei Schritten erfolgen, die in *Abbildung 3* schematisch dargestellt sind. Mittels Methoden der Bildverarbeitung werden für $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ die Positionen $X^{(i)}, Y^{(i)}$ aller n Fahrzeuge in jedem Einzelbild bestimmt. Ein Nachbearbeitungsprozess fasst die Ergebnisse zu den gesuchten Trajektorien zusammen.

Die Algorithmen der Bildverarbeitung werden in der Entwicklungsumgebung Halcon realisiert. Nach der Berechnung der unverzerrten Bilder ist eine Stabilisierung nötig, da die Bewegungen des HORUS kompensiert werden müssen. Die anschließende Hintergrund-Schätzung ermöglicht das Erkennen von Fahrzeugen. Mithilfe von Matlab werden im Rahmen der Nachbearbeitung Fehldetektionen entfernt und die verbliebenen Koordinaten den entsprechenden Fahrzeugen zugeordnet.

Die resultierenden Trajektorien können beispielsweise zur Formulierung eines mathematischen Überholmodells weiterverarbeitet werden. Die detaillierte Arbeitsweise des Algorithmus zur automatischen Auswertung von Luftbildern wird im Folgenden vorgestellt.

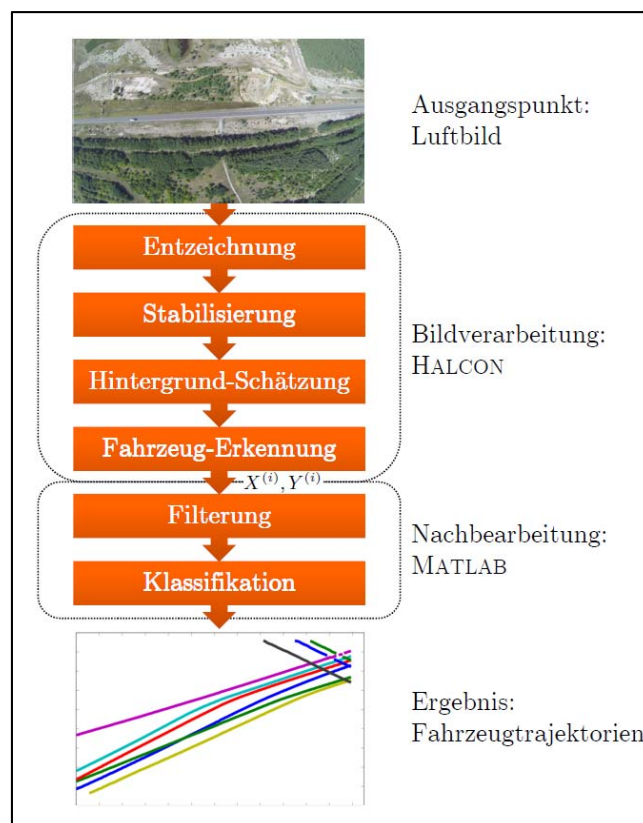


Abbildung 3: Algorithmus zur Auswertung von Luftbildern

5. ENTZEICHNUNG

Der Begriff der Entzeichnung beschreibt die Korrektur von Verzerrungseffekten. Das resultierende Bild entspricht dem linientreuen Modell der Zentralprojektion. Dieser Vorgang erleichtert die Weiterverarbeitung, da Form und Größe der abgebildeten Objekte unabhängig von der Position im Bild sind. Die Entzeichnung wurde in der Entwicklungsumgebung Halcon umgesetzt, die beliebige Verzerrungen unterstützt. Nach der Generierung eines regulären Gitters, welches die Geometrie des

zentralprojektiven Bildes repräsentiert, wird jeder Gitterpunkt verzeichnet. Mithilfe der resultierenden Koordinaten und Informationen über die Größe des Punktgitters sowie den ursprünglichen Gitterabstand kann eine Abbildungsvorschrift erstellt werden, die die Entzeichnung realisiert. Die Grauwertzuweisung erfolgt für jedes Pixel im Ausgabebild durch die bilineare Interpolation. Dabei werden die vier benachbarten Grauwerte einer berechneten Pixelposition in die Interpolation einbezogen. *Abbildung 4* demonstriert die Entzeichnung an einem Beispiel. Das in *Abbildung 4a* dargestellte Bild zeigt deutliche Effekte der tonnenförmigen Verzeichnung durch das Fischaugen-Objektiv, denn Bereiche am Bildrand wirken gestaucht. Daher werden auch die Straße und Fahrzeuge am Rand kleiner abgebildet als im Zentrum. Das rot markierte Punktgitter dient der Berechnung des entzeichneten Bildausschnittes in *Abbildung 4b*. Ein konstanter Gitterabstand von 200 Pixel wird erzeugt. Die ebenso transformierten Gitterpunkte verdeutlichen, dass die Bereiche am Bildrand gestreckt werden. Folglich kommt es im Randbereich zu Unschärfe, die die weitere Auswertung allerdings nicht beeinträchtigt. Das entzeichnete Bild ist mit 6200 Pixeln um den Faktor 1,6 breiter als das ursprüngliche Bild. Ausgehend vom entzeichneten Einzelbild ist die Transformation in Weltkoordinaten möglich. Der Messbereich umfasst im Rahmen dieses Projektes die Abbildung einer Straße, die im Vergleich zu der gesamten Projektionsfläche eine geringe Breite aufweist.

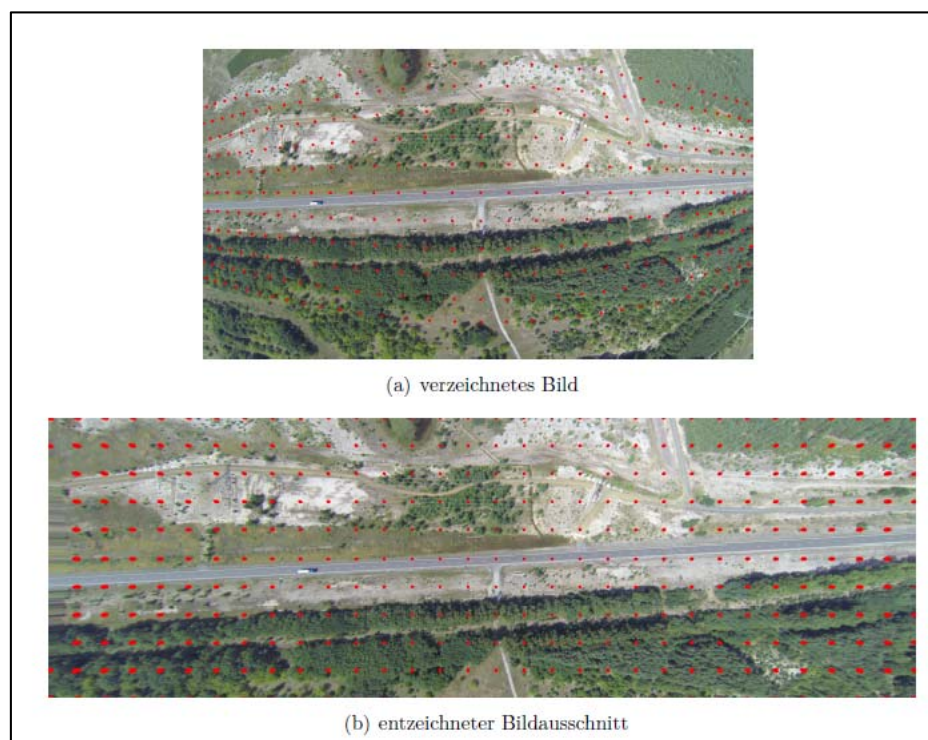


Abbildung 4: Beispiel Entzeichnung

6. STABILISIERUNG

Im Gegensatz zu einer stationären Kamera lassen sich leichte Bildbewegungen trotz roll- und nickkompensierter Aufhängung der Kamera bei der Nutzung eines Multirotor-UAS nicht vermeiden. Diese müssen durch eine Stabilisierung des Bildes weitestgehend kompensiert werden, um eine Bestimmung von Fahrzeugpositionen zu ermöglichen. Dabei sind die Verschiebungen und Drehungen der Bilder zueinander zu bestimmen und zu korrigieren. Ein möglicher Ansatz ist das Erkennen und Ausrichten von Bereichen am Straßenrand, die sich über die Messdauer nicht ändern. Um diese stationären Vergleichsmuster zu finden, kam das von Halcon bereitgestellte korrelationsbasierte Matching zum Einsatz. Als Ähnlichkeitsmaß zwischen einem Muster und dem Suchbereich dient dabei die normierte Kreuzkorrelationsfunktion. Die Stelle der maximalen Korrelation ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Position des Referenzmusters im Bild. Aus den Ergebnissen werden jeweils die Suchbereiche für das nächste Bild generiert. Dieses Vorgehen reduziert die Rechenzeit im Vergleich zu konstanten, größeren Suchbereichen.

Das korrelationsbasierte Matching ist robust gegen Unschärfe und lineare Helligkeitsänderungen. Allerdings ist das Verfahren empfindlich gegenüber Verdeckungen und nichtlinearen Beleuchtungsänderungen, beispielsweise aufgrund wechselnder Bewölkung. Aus diesem Grund

werden die Referenzmuster in regelmäßigen Abständen automatisch aktualisiert, sodass die Bilder auch bei wechselnder Bewölkung wie in *Abbildung 5* stabilisiert werden.



Abbildung 5: Nichtlineare Beleuchtungsänderungen

7. HINTERGRUND-SCHÄTZUNG

Die Basis für eine automatische Erkennung von bewegten Fahrzeugen ist ein Referenzbild, mit dem das zu analysierende Bild verglichen wird. Der Hintergrund der jeweiligen Szene enthält keine beweglichen Objekte und bietet sich daher als Referenz an. Bei der Ermittlung des Hintergrundbildes wurden folgende Probleme festgestellt:

- Tagsüber sind Bilder ohne Fahrzeuge auf durchschnittlich genutzten Straßen nur gelegentlich zu erfassen.
- Das Hintergrundbild verändert sich wegen wechselnder Licht- und Sichtbedingungen. Daraus folgt, dass ein statisches Referenzbild nicht existiert. Der Hintergrund muss demnach geschätzt und automatisch an die wechselnden Umgebungsbedingungen angepasst werden. Eine kontinuierliche Aktualisierung des Hintergrundbildes ermöglicht die Anpassung an Helligkeitsänderungen.

Da der Blickwinkel bei Windböen von den Sollwerten abweicht, verändert sich die perspektivische Verzerrung der betroffenen Einzelbilder. Im Referenzbild kommt es somit zu Unschärfe, die an den Kanten deutlich wird. Vor allem an den Rändern der Straßenmarkierungen tritt dieser Effekt auf, der im Verlauf der Fahrzeug-Erkennung berücksichtigt wird.

Die Hintergrund-Schätzung wurde in der Entwicklungsumgebung Halcon implementiert. Aus den Bildern, die in die Generierung des Referenzbildes einfließen, werden für jeden Farbkanal Mehrkanalbilder erstellt. Die Berechnung der pixelweisen Mittelwerte über die entsprechenden Kanäle mithilfe der in Halcon verfügbaren Prozeduren liefert das Ergebnis der Hintergrund-Schätzung.

8. FAHRZEUG-ERKENNUNG

Unter der Annahme, dass nur Fahrzeuge als bewegliche Objekte aufgenommen werden, lässt sich deren Position ermitteln. Dabei wird das zu analysierende Bild B_j vom Referenzbild B_R abgezogen. Für jedes von m zu analysierenden Einzelbildern B_j einer Sequenz ergibt sich mit $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ das Differenzbild

$$D_j = |B_R - B_j|$$

Es hat sich gezeigt, dass der Übergang vom RGB- in den HSV-Farbraum Vorteile bringt, denn anstelle des aus dem RGB-Bild ermittelten Grauwerts liefert die Nutzung des Helligkeit-Kanals V im HSV-Raum insbesondere bei farbigen Fahrzeugen eine robuste Detektion.

Zusammenhängende Regionen im Differenzbild D_j , die eine größere Helligkeit als ein Schwellenwert aufweisen, erzeugen das Binärbild \hat{D}_j und werden weiter betrachtet. Dabei müssen die folgenden allgemeingültigen Merkmale der Einzelregionen berücksichtigt werden:

- Ein Fahrzeug kann aus mehreren Regionen bestehen.
- Mehrere Fahrzeuge können in einer Region verschmelzen.
- Erkannte Regionen können, aber müssen nicht zwangsläufig zu Fahrzeugen gehören.

Weiterhin können von Halcon bereitgestellte morphologische Operatoren angewendet werden, um die Gestalt der Regionen zu verändern. Die Operation „Closing“ schließt Lücken in den Regionen, um ein homogenes Fahrzeugabbild zu erzeugen. Dabei folgt intern eine Erosion auf eine Dilatation. Alle gefundenen Regionen werden auf die Plausibilität geprüft, einem Fahrzeug zu entsprechen. Für die verwendete Auflösung ist eine Mindestgröße von 5x5 Pixeln und eine maximale Länge von 200 Pixeln sinnvoll.

Für einen beispielhaften entzeichneten Luftbildausschnitt B von der Messstrecke bei Hoyerswerda veranschaulicht *Abbildung 6* die Arbeitsschritte der Bildverarbeitung. Aus der betragsmäßigen Differenz zwischen dem Luftbildausschnitt B und dem Referenzbild B_R resultiert das Differenzbild D . Dessen Helligkeit-Kanal V dient zur Segmentierung mit einem Schwellenwert, sodass sich das Binärbild \hat{D} mit den farbig markierten Fahrzeugregionen ergibt.

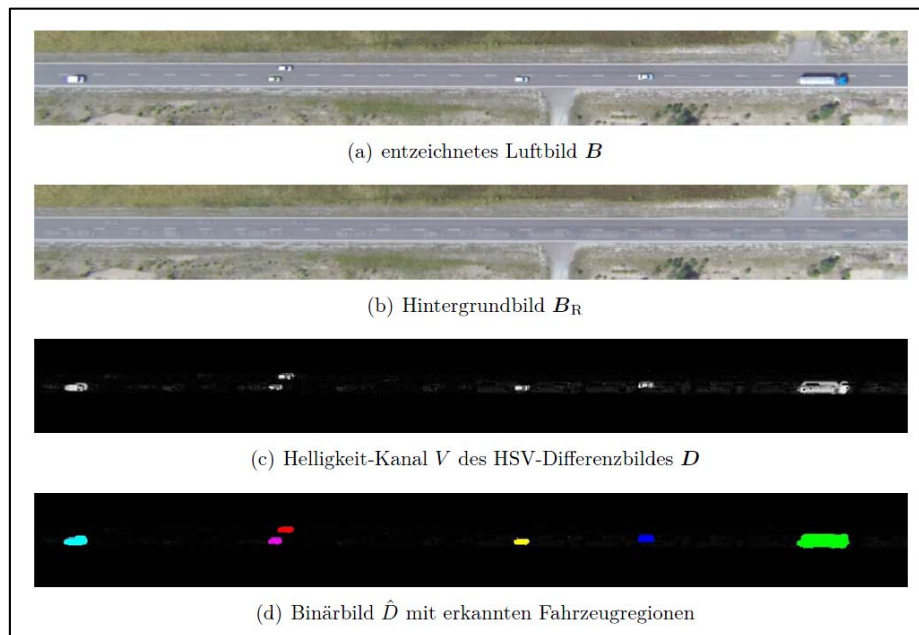


Abbildung 6: Bilder verschiedener Prozessschritte

9. FILTERUNG UND KLASSIFIKATION DER FAHRZEUGPOSITIONEN

Die für jedes Bild unabhängig gespeicherten Positionen werden im Rahmen einer Nachbearbeitung den entsprechenden Fahrzeugen zugeordnet. Diese Klassifikation wurde in Matlab implementiert und filtert Koordinaten heraus, die sich keinem Fahrzeug zuordnen lassen. Unter der Annahme, dass ein Fahrzeug in dem Zeitintervall zwischen zwei Einzelbildern eine kurze Strecke zurücklegt, können die wahrscheinlichsten Positionen gefunden werden, die den Weg eines bestimmten Fahrzeuges beschreiben. Die resultierenden Trajektorien kennzeichnen die Bewegung der Fahrzeuge in der Geländeebene. Für die weitere Auswertung der Überholvorgänge ist vor allem die Untersuchung der X-Richtung interessant. *Abbildung 7a* veranschaulicht einen beispielhaften Zeitverlauf der im Rahmen der Fahrzeug-Erkennung gespeicherten X-Koordinaten. Die diskreten Einträge sind keinem Fahrzeug zugeordnet und enthalten offensichtlich Fehldetektionen. Das Ergebnis nach der Filterung und Klassifikation zeigt *Abbildung 7*

b. Jede Kurve einer Farbe dokumentiert die Bewegung eines Fahrzeuges entlang der abgebildeten Straße und der Anstieg repräsentiert die Geschwindigkeit. Daher entspricht ein Überholvorgang dem Schnittpunkt zweier Kurven, die beide einen wachsenden oder fallenden Anstieg haben. In

b ist ein Überholvorgang bei $t = 9,5$ s zu sehen. Der Zeitverlauf der Y-Koordinaten und möglicher Ausgleichspolynome für die am Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge ist in *Abbildung 9c* dargestellt, das Ausscheren während des Überholens ist deutlich erkennbar.

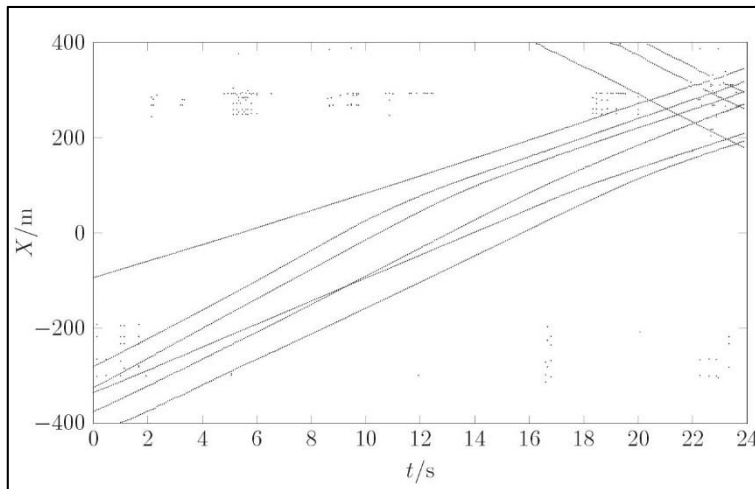


Abbildung 7a: Weltkoordinate X erkannter Fahrzeuge

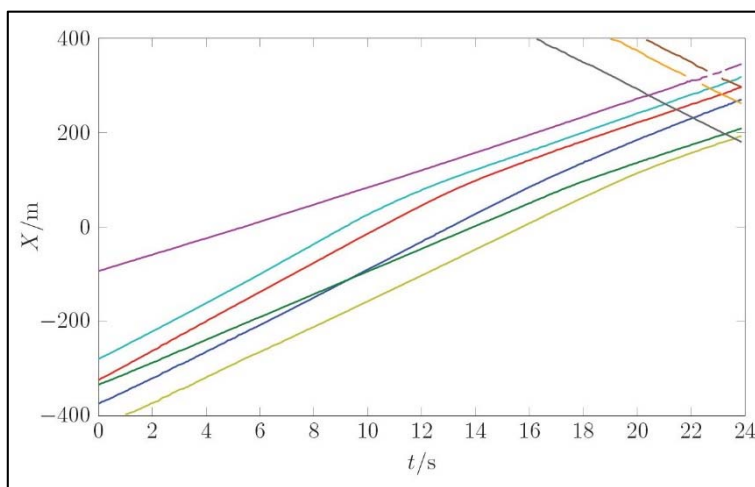


Abbildung 8b: Weltkoordinate X klassifizierter Fahrzeuge

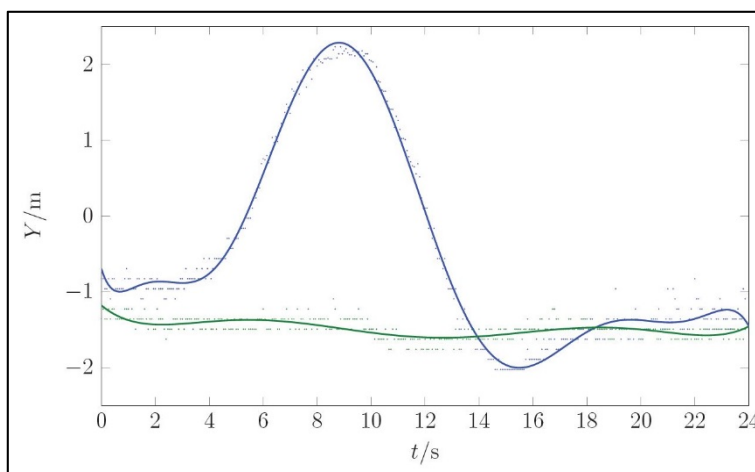


Abbildung 9c: Weltkoordinate Y klassifizierter Fahrzeuge

10. AUSBLICK

Die in diesem Vorhaben vorgestellten Lösungsansätze zur automatischen Auswertung von Überholvorgängen aus Luftbildaufnahmen können auf andere Anwendungsbereiche erweitert werden. Die automatische Analyse der Bewegung von Fahrzeugen ist beispielsweise ebenso in Kurven oder Kreuzungsbereichen möglich, denn das vollständige Abbildungsmodell transformiert die

Pixelkoordinaten für den gesamten Bildbereich in Weltkoordinaten. Somit könnten die Geschwindigkeiten und Abstände im Bereich von Unfallschwerpunkten gemessen oder Abbiegevorgänge untersucht werden. Ebenso ist die Beobachtung von gefährlichen Kreuzungsbereichen oder großen Verkehrsknotenpunkten realisierbar. Die Erkennung aller aufgenommenen Fahrzeuge erlaubt des Weiteren die Ermittlung von Kenngrößen der Verkehrsplanung, beispielsweise der Verkehrsstärke. Diese dient der Beurteilung von Qualität, Leistungsfähigkeit und Sicherheit eines Verkehrsablaufs und stellt die Grundlage für eine verkehrstechnische Dimensionierung beim Straßenentwurf dar. Die Modularisierung der vorgestellten Algorithmen begünstigt ebenso Weiterentwicklungen: So kann der Grad der Automatisierung weiter gesteigert werden, wenn alternative Methoden der Bildstabilisierung ohne die manuelle Auswahl von Vergleichsmustern ähnlich gute Ergebnisse liefern. Beispielsweise ist die Nutzung von mindestens drei signalisierten Passpunkten mit bekannten Koordinaten im Messbereich denkbar. Falls diese nicht auf einer Geraden liegen, kann ein räumlicher Rückwärtsschnitt die externen Kameraparameter für jedes Einzelbild liefern, die eine automatische Korrektur von Rotation und Translation durch affine Transformationen erlauben. Neben der erleichterten Auswertung großer Datenmengen können auf diese Weise die Messunsicherheiten der ermittelten Weltkoordinaten reduziert werden. Allerdings würde sich der Messaufwand erhöhen, sodass die Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer durch auffällige Passpunkte nicht auszuschließen wäre.

Bereits jetzt ist die im Rahmen dieses Projektes entwickelte automatische Auswertung von Luftbildaufnahmen ein nützliches und effizientes Hilfsmittel bei der Analyse von Überholvorgängen und kann somit die weiträumige Verkehrsbeobachtung mithilfe von UAS für zukünftige Anwendungen unterstützen.

11. LITERATUR

Lippold, Christian; Vettters, Anne; Steinert, Frank: *Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen - I. Zwischenbericht.* Dresden, 2013

Airclip - HORUS. <http://airclip.de/copter>, Abruf: 12. Februar 2014

Schneider, Danilo; Schwalbe, Elke; Maas, Hans-Gerd: *Validation of geometric models for fisheye lenses.* In: *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2009), Nr. 3, S. 259 – 266

Hughes, Ciarán; Denny, Patrick; Jones, Edward; Glavin, Martin: *Accuracy of fish-eye lens models.* In: *Applied Optics* 49 (2010), Jun, Nr. 17, S. 3338 – 3347

Luhmann, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie / Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* 3. Aufl. Berlin : Wichmann, 2010

Döge, Klaus-Peter: *Videodetektion im Straßenverkehr.* München : Oldenburg, 2013

Höfler, Frank: *Verkehrswesen-Praxis - 2 : Verkehrstechnik.* Bauwerk, 2006

HALCON Version 9.0.4 - Referenzhandbuch. Version: 2011. <http://download.mvtec.com/halcon-9.0-reference-hdevelop-de.pdf>, Abruf: 22. Januar 2014