

Abschlussbericht

zum
Projektabschluss

Projekt

Supporting the **Man-in-the-loop** in **Roadtunnel** (SMaRt)

Teilprojekt

RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen

Förderkennzeichen: 01IS21033B

Fördermaßnahme:

KMU Innovativ: Informations- und
Kommunikationstechnologie (IKT)

Forschungsbereich:

Datenwissenschaft, Informationstechnologie, Industrie 4.0

Anwendungsfeld bzw. Branche:

Automobil und Mobilität

Berichtszeitraum

01.07.2021 – 30.06.2024

Projektpartner:

ave

Verkehrs- und Informationstechnik GmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21033A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/dem Autor.“ (Nr. 5.2.2 NKBF 2017)

Inhalt

Aufbau	- 4 -
Teil I - Kurzbericht	5
Ursprüngliche Aufgabenstellung, wissenschaftlicher und technischer Stand	6
Teil II - Schlussbericht	7
Ablauf des Vorhabens	7
Inhalte des Vorhabens.....	8
Wesentliche Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen ..	9
Projektdurchführung	10
Durchgeführte Arbeiten sowie Vergleich zur ursprünglichen Planung	11
Motivation und Aufgabenstellung.....	11
Darstellung der durchgeführten Arbeiten sowie aufgetretener Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung.....	13
Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	25
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....	25
Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	26
Voraussichtliche Nutzen.....	26
Verwertbarkeit des Ergebnisses	26
Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	26
Erfolgte Veröffentlichungen	27

Aufbau

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Gesamtprojektergebnisse des Zuwendungsempfängers RWTH Aachen, ausführende Stelle: Institut für Straßenwesen (ISAC) im Rahmen des Forschungsverbundprojektes SMaRt (**S**upporting the **M**an-in-the-loop in **R**oad**t**unnel).

Das Forschungsvorhaben wurde zusammen mit dem Partner *ave Verkehrs- und Informationstechnik GmbH* bearbeitet.

Die Dokumentation umfasst die gesamte Projektlaufzeit vom 01.07.2021 – 30.06.2024.

Entsprechend dem Muster „Sachbericht zum Verwendungsnachweis“ gliedert sich der Schlussbericht in die drei Teile:

Teil I: Kurzbericht

Teil II: Eingehende Darstellung

Abschlussbericht SMaRt

Teil I - Kurzbericht

Das Projekt „Supporting the Man-in-the-loop in Roadtunnel (SMaRt)“, das von dem deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, hatte zum Ziel, die Arbeitsbedingungen für Tunnelbetreiber und Operatoren durch den Einsatz innovativer KI-Algorithmen zu verbessern.

Die Arbeit von Tunnelbetreibern wird zunehmend durch eine steigende Informationsflut belastet, was zu Überlastungen führt und die Sicherheit beeinträchtigt. Aktuelle Systeme zur Verkehrsüberwachung und Incident Detection folgen meist einem zweistufigen Ansatz: Ein automatisiertes System zur Vorfallerkennung wird von den Betreibern zur endgültigen Bestätigung ergänzt. Abhängig von der Zuverlässigkeit des verwendeten Systems bedeutet dies mehr oder weniger "zusätzliche" Arbeit für den Betreiber.

Im Rahmen des dreijährigen SMaRt-Projekts (2021-2024) wurden KI-basierte Methoden entwickelt, um die Vorfallerkennung zu verbessern und somit die Arbeitsbelastung der Operatoren zu reduzieren. Hierzu wurden zunächst einzelne KI-Ansätze für die beiden Sensortechnologien „Intelligente Induktionsschleife“ und „Video“ entwickelt. In einem weiteren Schritt wurden dann die beiden KI-basierten Sensortechnologie-Ansätze intelligent zu einem gemeinsamen Verfahren gekoppelt, wodurch ein hybrider Detektionsansatz entstand. Die KI wird auf drei Ebenen eingesetzt: Sensorlevel (Intelligente Induktionsschleifen und Video), Datenfusionsebene sowie GUI-/Betreiber-Ebene.

Das SMaRt-Projekt zielt darauf ab, innovative Lösungen zur schnelleren Erkennung signifikanter Anomalien im Verkehrsfluss zu finden. Dies geschieht in drei Phasen: Zunächst wird eine Stand-alone-KI auf Sensorlevel implementiert, gefolgt von einer verbundenen KI auf Fusionslevel und schließlich einer weitgehend verbundenen KI auf GUI-/Betreiber-Ebene.

Um die im Forschungsprojekt angestrebten Ziele bestmöglich zu erreichen sowie um den angestrebten Nutzen erfolgreich generieren und verifizieren zu können wurde das Projekt von einem Konsortium bearbeitet, das alle wesentlichen Arbeitsfelder kompetent abdeckt. Das Konsortium bestand aus dem KMU ave Verkehrs- und Informationstechnik GmbH (Projektpartner), der universitären Forschungseinrichtung, dem Institut für Straßenwesen (ISAC) der RWTH Aachen University (Projektpartner) sowie dem Infrastrukturbetreiber der Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern (assoziierter Projektpartner).

Die Ergebnisse zeigen, dass KI-Algorithmen helfen können, Loop- und Videotechnologie zu kombinieren, um die Vorteile beider Technologien zu nutzen. Im Projekt werden sowohl optische als auch elektromagnetische Technologien verwendet. Die „Intelligente Induktionsschleife“ erfasst zuverlässig Verkehrsdaten, während das Videosystem eine hohe räumliche Auflösung bietet

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das SMaRt-Projekt einen wichtigen Schritt in Richtung einer effektiveren Unterstützung für Tunnelbetreiber darstellt, indem es moderne Technologien wie Künstliche Intelligenz nutzt, um Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr zu erhöhen.

Abschlussbericht SMaRt

Ursprüngliche Aufgabenstellung, wissenschaftlicher und technischer Stand

Selbst in einer zunehmend digitalisierten Welt werden nach wie vor noch viele Entscheidungen manuell, also durch direkte Beteiligung eines Menschen, getroffen. Hochkomplexe technische Systeme und Abläufe werden von sogenannten Operatoren, den für den Prozess verantwortliche Personen, überwacht. Im Falle eines Störfalls stellt das technische System den Operatoren zwar automatisiert Informationen zur Verfügung, die diesen in die Lage versetzen sollen den aktuellen Zustand des Prozesses sehr schnell zu erfassen, aber das Auswählen von notwendigen und geeigneten Gegenmaßnahmen sowie das Einleiten dieser geschieht nach wie vor durch den Operator. Dieser auch „man-in-the-loop“ genannte Ansatz wird themenübergreifend in zahlreichen Anwendungsbereichen eingesetzt. In vielen dieser Bereiche kommt es jedoch durch die große Informationsflut und eine nur unzureichend adaptive Auswertung der Informationen zu einer konstanten Überlastung der Operatoren und damit zu einer Reduktion der Sicherheit. Besonders in Bereichen der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur beruhen die heute angewendeten Ansätze noch zu häufig auf klassischen, also nicht-lernenden Algorithmen, die nicht mehr den modernen Stand der Technik widerspiegeln.

Ziel von SMaRt war es daher innovative Algorithmen der Künstlichen Intelligenz (KI) zu entwickeln, um eine bessere Störfalldetektion ermöglichen, als es derzeit mittels konventioneller Algorithmen möglich ist. Hierdurch sollen die Störfalldetektion in Straßentunneln und resultierend daraus die Arbeitsbedingungen der Tunneloperatoren signifikant verbessert werden.

In der Wissenschaft werden KI-Algorithmen und Ansätze im Bereich der Verkehrstechnik bereits seit verschiedenen Jahren immer einmal wieder erforscht. Beispielsweise wurden im mehr oder weniger parallel laufenden ebenfalls vom BMBF geförderten Forschungsprojekt KITT (Künstliche Intelligenz zur Verbesserung der Sicherheit von Tunneln und Tunnelleitzentralen) auch KI-Ansätze für Tunnel untersucht. Hier stand aber mehr die Risikobewertung bis zur Risikobewertung des Tunnelbauwerks an sich im Vordergrund. Der in SMaRt gewählte innovative und vielversprechende Ansatz eines KI-basierten hybriden Systems bestehend aus Video- und Intelligenter Induktionsschleifentechnologie wurde dort genauso wenig wie in andern dem Konsortium bekannten Projekten untersucht.

Teil II - Schlussbericht

Ablauf des Vorhabens

Das dreijährige Forschungsprojekt SMaRt bestand aus 5 Arbeitspaketen, an denen das ISAC an allen beteiligt war. Das ISAC, und hier speziell die Abteilung Digitalisierung im Straßenwesen mit ihren (technischen) Informatikern, hat seine Kompetenzen im Bereich der videobasierten Störfalldetektion und der Softwareentwicklung sowohl in der klassischen Bildverarbeitung als auch mit lernfähigen Algorithmen (KI/ML) ins Forschungsprojekt eingebracht. Als Gesamtprojektleiterfungierte die AVE GmbH.

Das Forschungsprojekt unterteilt sich in drei Projektphasen:

- (1) **Theorie und Algorithmen:** Aufbau von Kompetenzen im Bereich KI und Videodetektion beim KMU ave. U.A. durch Wissenstransfer vom ISAC
- (2) **Entwicklung und prototypische Umsetzung:** Entwicklung der prototypischen Module zur optimierten Störfallerfassung und zur optimierten Videoverifikation. Implementierung im Testfeld.
- (3) **Test- und Optimierung:** Testbetrieb der neuen Module. Testbetrieb des hybriden Gesamtsystems. Optimierung basiert auf Rückkopplung von Feedback der Operatoren

Innerhalb von AP1 war das ISAC an der Spezifikation des Gesamtsystems zur Erstellung der übergeordneten Systemspezifikationen und der gemeinsamen Schnittstellen, der Anforderungsanalyse zur Definition und Klassifizierung der für das Teilsystem Videodetektion relevanten Funktionalitäten nach MoSCoW-Priorisierung sowie dem Datenschutz beteiligt. Die Arbeiten des ISAC vielen insbesondere zu Beginn und z.T. Datenschutz auch noch in 2024 an.

Im 24-monatigen AP2 wurden von der AVE GmbH innovative KI-basierte Algorithmen für die Intelligente Induktionsschleifendetektion entwickelt. Während der Dauer des gesamten Forschungsprojekts fand zwischen dem KMU ave und der Forschungseinrichtung ISAC in regelmäßigen Intervallen ein Wissenstransfer statt. Dieser umfasst sowohl Grundlagen (KI und Videodetektion) als auch eine gemeinsame Validierung der darauf aufbauend erzielten (Zwischen-)Ergebnisse. Im AP 2 ging es speziell um den Wissenstransfer im Bereich KI mit dem Ziel, ein neues prototypisches KI basiertes Modul zur „Intelligente Induktionsschleifendetektion“ zu entwickeln

Parallel zum AP2 entwickelte das ISAC im AP3 KI-basierte Algorithmen für die Videodetektion. Die erzielten Ergebnisse wurden mit ave geteilt, diskutiert und optimiert. In einem mehrstufigen Verfahren wurden die gefundenen sowie neu entworfenen Algorithmen zu einem System zusammengesetzt. Integraler Bestandteil der Algorithmen sind lernende Algorithmen. Der Aufbau dieser Algorithmen ebenso wie das Anlegen der benötigten Trainingsdaten (neben den bereits vorhandenen Daten) ist ebenfalls Teil dieses Arbeitspaketes gewesen.

Im gemeinsam von ave und dem ISAC im Anschluss an AP2 und AP3 bearbeiteten 12-monatigen AP4 wurden die KI-basierten Ansätze zu einem hybriden Detektionsverfahren gekoppelt. Das Verfahren wurde prototypisch umgesetzt, im Demonstrator implementiert, getestet und validiert.

Das über die gesamte dreijährige Projektlaufzeit anstehende AP5 beschäftigte sich mit dem Aufbau und Betrieb eines Demonstrators. Als Demonstrator konnten Teile der Einhausung Goldbach-Hösbach auf der BAB A3 genutzt werden. Um Kosten und Aufwand zu sparen wurde dort ein in einem früheren Forschungsprojekt schon einmal genutztes Testfeld ertüchtigt, aktualisiert und in Betrieb genommen. Der Demonstrator wurde während der Projektlaufzeit zur Erhebung von Daten, zum Testen der Algorithmen und prototypischen Verfahren sowie zur Validierung dieser genutzt.

Abschlussbericht SMaRt

Inhalte des Vorhabens

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde gemeinsam mit der Firma AVE ein System zur Störfalldetektion in Straßentunneln entwickelt. Das Alleinstellungsmerkmal dieses Projektes ist die intelligente Integration unterschiedlicher Sensoren mittels KI um den Menschen im Loop mit den bestmöglichen Warnungen auszustatten.

Im Rahmen des Teilprojektes wurde insbesondere die Kamerabasierte Detektion von Störfällen entwickelt. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche sowohl der Wissenschaft als auch der tatsächlich aktuell kommerziell genutzten Systeme wurde herausgearbeitet, dass bestehende Systeme zur Videobasierten KI Störfalldetektion üblicherweise als alleinstehende Systeme konzipiert werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Lösung gesucht, welche sich insbesondere gut mit einem Schleifenbasierten System durch positive Synergien ergänzt. Dabei wurden viele Designentscheidungen erarbeitet, welche sonst noch nicht verwendet werden. Die konkreten Anforderungen sind dabei wie folgt:

- Sehr schnelle Bestätigungen von Voralarmen
- Bewertung von vielen Kameras innerhalb eines Streckenabschnittes Synchron
- Geringe Korrelation zwischen den Fehlalarmraten

Ziel ist es das bestehende System zu ergänzen. Während die meisten videobasierten Systeme enorm niedrige False-Positive Raten besitzen müssen, ist dies nicht nötig, wenn ein System erst in zweiter Instanz gestartet wird. Aufwendige Vorverarbeitungsschritte zum Zeitpunkt eines Voralarms sind aufgrund des Zeitkritischen Charakters nicht praktikabel. Es wurden daher unterschiedliche Systeme entwickelt, welche jeweils direkt in einem Prozessschritt arbeiten. Grundlage für diese Systeme ist ein rund um die Uhr laufender Zwischenspeicher des Videos der letzten 30 Sekunden. Weiterhin sind keine durchgehend laufenden Systeme notwendig.

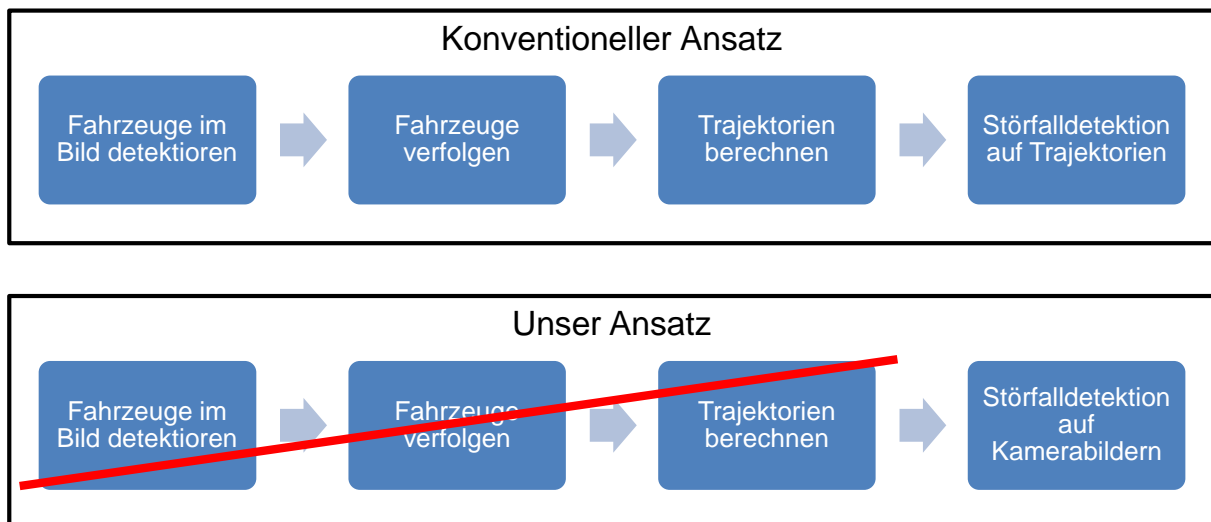


Abbildung 1: Kamerabasiertes System zur Erkennung von Vorfällen

Genutzt wurden Daten aus dem Hösbachtunnel. Das Testfeld im Hösbachtunnel besteht aus drei Messquerschnitten mit intelligenten Doppelinduktionsschleifen nach TLS Typ2. Diese drei Messquerschnitte bilden zwei Messstrecken von ca. 480m und 330m, die jeweils von zwei benachbarten Messquerschnitten begrenzt werden. Damit ergibt sich eine Gesamtlänge des Tunnels

Abschlussbericht SMaRt

von ca. 810 m mit drei Hauptfahrbahnen und Standstreifen sowie im Abschnitt 1 eine Ausfahrt und im Abschnitt 2 eine Zufahrt (Bild 2). Darüber hinaus sind im Hösbachtunnel verschiedene Videokameras installiert, die einen guten visuellen Überblick über den gesamten Tunnel, einschließlich des Testbereichs, bieten.

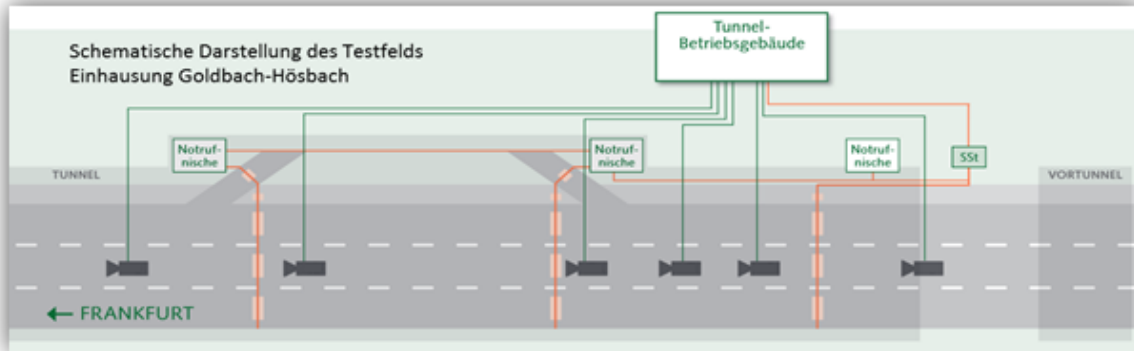


Abbildung 2: Schematisches Layout des Testfeldes im Hösbachtunnel

Im Forschungsprojekt SMaRt sollen mit Hilfe von KI neue Lösungen gefunden werden, die helfen, signifikante Anomalien im Verkehrsfluss schneller zu erkennen und damit die Betreiber - den Man-in-the-Loop - deutlich zu unterstützen. Zur Erkennung dieser Anomalien werden sowohl der Sensor „Intelligent Induction Loop“ der Firma ave als auch das Videodetektions-/ CCTV-System der RWTH / ISAC eingesetzt.

Wesentliche Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen des dreijährigen SMaRt-Projekts (2021-2024) wurden vom ISAC KI-basierte Methoden entwickelt, um die Störfallerkennung zu verbessern und somit die Arbeitsbelastung der Operatoren zu reduzieren. Es konnte gezeigt werden, dass mittels dieser Ansätze in einigen Bereichen vielversprechend Ergebnisse erzielt werden konnten.

Die Kopplung dieser vielversprechenden Ansätze mit den von der AVE GmbH entwickelten Induktionsschleifen führte zu einem hybriden Detektionssystem. Ziel war es die jeweiligen Vorteile der Video- (schnell und ortsunabhängig) und der intelligenten Induktionsschleifen Technologie (sehr zuverlässig und robust) zu nutzen. Hierbei mussten zuerst einmal Verfahren und Strategien entwickelt werden, wie und in welchem Umfang diese grundlegend unterschiedlichen Technologien sinnvoll miteinander verknüpft werden konnten. Im Forschungsprojekt wurden durch die Intelligente Detektionsschleifentechnologie sogenannte Voralarme generiert, die dann mithilfe der Videodetektion (schneller als in Echtzeit) validiert wurden. Hierdurch konnten die systemimmanenten teilweise längeren Validierungszeiten der Intelligenten Induktionsschleifentechnologie optimiert werden, was zu einem Zeitgewinn führte. Das hybride Verfahren wurde prototypisch in einem Demonstrator implementiert, getestet und validiert. Auch hier wurden vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Störfalldetektion sowie der Alarmierungszeiten erzielt.

Am ISAC wurden die Methoden und Algorithmen mit Kollegen diskutiert und Studierenden im Rahmen von Lehrveranstaltungen (z.B. Tunnelbetrieb und Straßenplanung II) vorgestellt und diskutiert. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Konferenz an der TU Graz wurden Zwischenergebnisse einem breiten Fachpublikum präsentiert.

Abschlussbericht SMaRt

Projektdurchführung

Im Rahmen des KMU Innovativ Verbundprojektes SMaRt hat das **Institut für Straßenwesen (ISAC)** als Teil der **RWTH Aachen University** die Bearbeitung der nachfolgenden Arbeitspakete (AP) durchgeführt. Zusätzlich gab es AP, die gemeinsam vom Verbundpartner die ave Verkehrs- und Informationstechnik GmbH (ave) und dem ISAC bearbeitet wurden. Diese sind ebenfalls aufgeführt. In diesen AP wurden unter anderem die Forschungsergebnisse der Verbundpartner diskutiert und mittels Wissenstransfers ausgetauscht. AP, die nur von der AVE GmbH bearbeitet wurden, sind nachfolgend nicht aufgeführt.

Neben der Darstellung der ISAC in den AP durchgeführten Arbeiten wird ein Vergleich zur ursprünglichen Planung durchgeführt. Darüber hinaus werden wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises erläutert sowie auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten eingegangen. Ebenfalls wird der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses, im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans und die während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens kurz beleuchtet. Abschließend werden die erfolgten und/oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses aufgezeigt.

Übersicht über die vom ISAC bearbeiteten AP:

AP 1 – Projektkoordinierung & -leitung

- AP 1.2 – Spezifikation des Gesamtsystem
- AP 1.3 – Technische Anforderungsanalyse
- AP 1.4 – Datenschutz

AP 2 – Intelligente Induktionsschleifendetektion

- AP 2.2 – Wissenstransfer KI mit dem ISAC

AP 3 – Videodetektion

- AP 3.1 –Literaturanalyse und Konzeptionierung
- AP 3.2 –Entwicklung von Algorithmen und Verfahren
- AP 3.3 –Prototypische Umsetzung
- AP 3.4 –Training mit offline Daten
- AP 3.5 – Training mit online Daten
- AP 3.6 – Wissenstransfer Videodetektion
- AP 3.7 –Optimierung der Algorithmen

AP 4 – Hybride Detektion

- AP 4.1 – Literaturanalyse & Konzeptionierung
- AP 4.2 – Wissenstransfer KI mit dem ISAC
- AP 4.3 – Entwicklung von Algorithmen
- AP 4.4 – Prototypische Umsetzung
- AP 4.5 – Training mit offline Daten
- AP 4.6 – Training mit online Daten
- AP 4.7 – Optimierung der Algorithmen

AP 5 – Demonstrator

- AP 5.1 – Koordination Dem
- AP 5.2 – Schnittstellen Implementierung
- AP 5.3 – Installation
- AP 5.4 – Testbetrieb und Optimierung
- AP 5.5 – Validierung und Rückkopplung

Abschlussbericht SMaRt

Durchgeführte Arbeiten sowie Vergleich zur ursprünglichen Planung

Die einzelnen Tätigkeiten des Instituts für Straßenwesen wurden in enger Abstimmung mit dem Verbundpartner, der ave GmbH, durchgeführt. Für ein besseres Verständnis der einzelnen Tätigkeiten werden zunächst kurz die Motivation und Aufgabenstellung des Vorhabens SMaRt erläutert. Die Beschreibung der vom ISAC in der Projektlaufzeit durchgeführten Arbeiten sowie ggf. aufgetretener Abweichungen zur ursprünglichen Planung folgen im Anschluss.

Motivation und Aufgabenstellung

Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Straßentunneln sind Operatoren in Betriebszentralen unabdingbar. Die Operatoren sind zur Beurteilung und Bewertung aller auftretenden Ergebnisse in Tunneln verantwortlich. Erst nach der Einschätzung durch die Operatoren werden die geeigneten Maßnahmen ergriffen. Das bedeutet aber, dass nach wie vor noch viele Entscheidungen „manuell“, also durch direkte Beteiligung eines Menschen, getroffen werden.

Im Falle eines Störfalls stellt das technische System den Operatoren zwar automatisiert Informationen zur Verfügung, die diese in die Lage versetzen sollen, den aktuellen Zustand des Prozesses sehr schnell zu erfassen, aber das Auswählen von notwendigen und geeignete Gegenmaßnahmen sowie das Einleiten dieser geschieht nach wie vor durch den Operator. Dieser auch „man-in-the-loop“ genannte Ansatz wird themenübergreifend in mannigfaltigen Anwendungsbereichen eingesetzt.

Besonders in Bereichen der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur beruhen die heute angewendeten Ansätze noch zu häufig auf klassischen, also nicht-lernenden Algorithmen, die nicht mehr den modernen Stand der Technik widerspiegeln. So werden beispielsweise immer noch viele Kilometer Autobahn (zusätzlich) visuell von Operatoren mittels Videobildauswertung überwacht, selbst wenn dort eigentlich bereits automatisierte Systeme zur Störfalldetektion verbaut sind. Gründe hierfür sind, dass die Zuverlässigkeit bzw. Funktionsweise der verbauten Systeme häufig nicht den Anforderungen der Operatoren entspricht, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie beispielsweise Straßentunneln.

Im Forschungsprojekt SMaRt wurden deswegen innovative Algorithmen der Künstlichen Intelligenz (KI) eingesetzt, um die Arbeitsbedingungen für Operatoren im Bereich der sicherheitskritischen Infrastruktur Tunnel signifikant zu verbessern. Dabei geht es zum einen um eine Optimierung der Detektion von kritischen Situationen mittels der bereits jetzt sehr zuverlässigen „Intelligenten Induktionsschleifentechnologie“ und zum anderen um die gezielte Überprüfung der so identifizierten kritischen Situationen über Videokameras. Hierdurch entstand ein KI basierter hybrider Detektionsansatz, der dazu beitragen kann schneller, zuverlässiger und zielgerichteter wesentliche kritische Situationen im aktuellen Verkehrsablauf automatisiert zu erkennen.

Abschlussbericht SMaRt

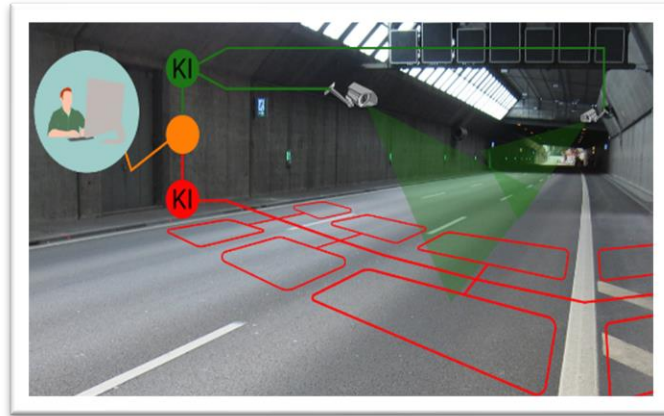


Abbildung 3: Darstellung des KI-basierten hybriden Detektionsansatzes in SMaRt (Quelle: ISAC/ave)

Abschlussbericht SMaRt

Darstellung der durchgeführten Arbeiten sowie aufgetretener Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung

Im Folgenden werden die vom Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen

- geplanten Arbeiten der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung
- im Projekt tatsächlich durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse
- ggf. aufgetretene Abweichungen zwischen den ursprünglich geplanten und tatsächlich durchgeführten Arbeiten

beschrieben und erläutert.

Der für diese Arbeiten aufgestellte Zeitplan konnte mit zeitlichen Verschiebungen im Wesentlichen eingehalten werden. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Aufgabenpakete (AP), die Meilensteine und ihre zeitlichen Zusammenhänge, und ist der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung entnommen.

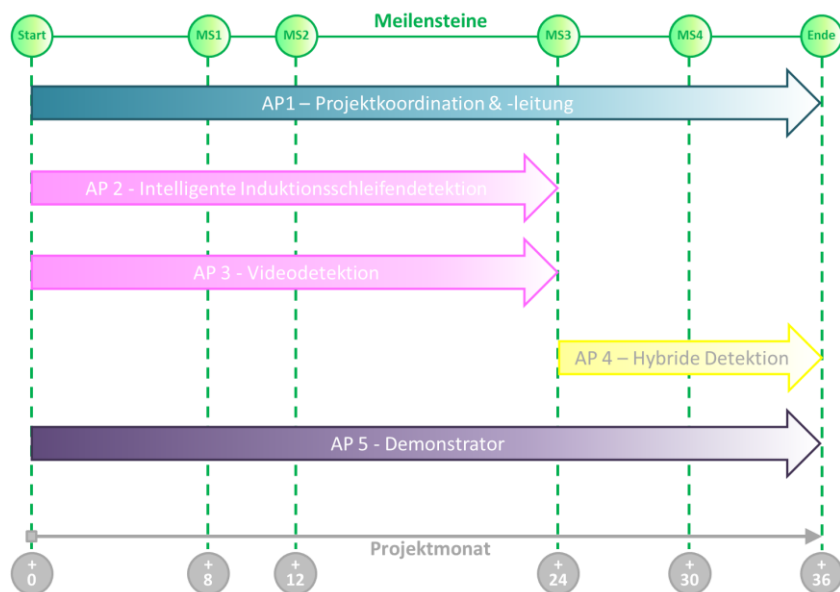


Abbildung 4: AP – Meilensteine – Überblick (Quelle: ave)

Auch wenn es zeitlich teilweise zu Verzögerungen kam, so konnten alle geplanten Meilensteine inhaltlich während der Projektlaufzeit erreicht werden. Die in der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung geplanten und enthaltenen Meilensteine können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Abschlussbericht SMaRt

AP 1 – Projektkoordination & -leitung

In diesem Arbeitspaket wurden die administrativen Aufgaben, die zur erfolgreichen Abwicklung und Leitung des Forschungsprojektes SMaRt notwendig waren, durch ave bearbeitet. Das ISAC war hier über die Abstimmungen im Verbund beteiligt sowie bei der Erarbeitung der technischen Spezifikationen der APs 1.2 bis 1.4.

Vom ISAC im AP1 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Alle Arbeiten der ursprünglichen Planung wurden erfolgreich durchgeführt. Das Forschungsprojekt SMaRt konnte im Wesentlichen wie geplant bearbeitet und durchgeführt werden. Alle geplanten Ergebnisse konnten erzielt werden.

Übergeordnete Systemspezifikationen und technische Anforderungen für die Ertüchtigung und/oder das Update des Demonstrators sind planmäßig definiert worden. Speziell die Abstimmungsarbeiten zur Ertüchtigung des Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hösbach führten dabei zu außerplanmäßigem Mehraufwand in Bezug auf die benötigte Zeitspanne und den Arbeitsaufwand.

Während der zweiten Phase der Antragstellung kam es zur Umstrukturierung innerhalb der Autobahnlandschaft in Deutschland. Die „Autobahndirektion Nordbayern“ wurde in die „Autobahn GmbH des Bundes“ als „Niederlassung Nordbayern“ integriert. Hierdurch ergaben sich neue Anforderungen und Randbedingungen. Insbesondere sind hier die hohen Anforderungen durch die Anlagen- bzw. Datenschutzverordnungen im Bereich von sicherheitskritischen Infrastrukturen (Stichwort KRITIS) zu nennen, die sowohl die Schnittstellen innerhalb des Demonstrators vor Ort in der Einhausung Goldbach-Hösbach sowie ebenfalls die externen Schnittstellen zwischen dem Demonstrator und dem ISAC betrafen (gleiches galt für ave).

Eine weitere Herausforderung in AP1 sowie dem gesamten Forschungsprojekt SMaRt war der Ausbruch der weltweiten Corona Pandemie. Hierdurch kam es ebenfalls zu außerplanmäßigem Mehraufwand mit sich ständig ändernden Rahmenbedingungen, der teilweise auch zu zeitlichen Verschiebungen von Arbeiten und Meilensteinen führte. Trotz der erschwerten Rahmenbedingungen konnte das Projekt inhaltlich im Wesentlichen wie geplant durchgeführt werden.

Abweichungen zur ursprüngliche Vorhabensbeschreibung

Es gab keine wesentlichen Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung (inhaltlich) und den tatsächlich durchgeführten Arbeiten im Arbeitspaket „AP1 - Projektkoordination & -leitung“. Hinsichtlich des ursprünglichen Zeitplans kam es im AP 1 teilweise zu Verschiebungen.

AP 2 – Intelligente Induktionsschleifendetektion

Dieses AP wurde hauptsächlich von der ave GmbH bearbeitet. Die Arbeiten vom ISAC lagen in diesem AP im Wesentlichen im Bereich des Wissenstransfers der KI-basierten Videodetektion (AP 2.2). Dieses umfasst sowohl Grundlagen als auch eine gemeinsame Validierung der darauf aufbauend erzielten Zwischenergebnisse.

Abschlussbericht SMaRt

Vom ISAC in AP 2 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Alle Arbeiten der ursprünglichen Planung für das AP 2.2 wurden erfolgreich durchgeführt.

Aufbauend auf den Tätigkeiten von ave aus AP 2 und dem ISAC aus AP 3 konnte ein konstruktiver Wissensaustausch vorgenommen werden.

Die allgemeine Literaturrecherche sowie der Austausch mit ave hinsichtlich generell einsetzbarer KI-Ansätze ergaben, dass es verschiedene potenzielle KI-Ansätze für den Einsatz im Bereich der Intelligenten Induktionsschleifentechnologie gibt. Es wurden exemplarisch verschiedene 1- und 2-dimensionale KI-Ansätze, sogenannte Linien- und Bildauswertungsansätze, diskutiert und umgesetzt. Schlussendlich wurde ein vielversprechender 1-dimensionaler KI-Ansatz im Anschluss an die Literaturrecherche gewählt.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes SMaRt wurde mit dem entwickelten optimierten KI-Algorithmus weitergearbeitet.

Abweichungen zur ursprüngliche Vorhabensbeschreibung

Es gab keine wesentlichen inhaltlich Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung und den tatsächlich durchgeführten Arbeiten. Aufgrund von Verzögerungen bei der Ertüchtigung des Demonstrators, waren der Demonstrator selbst sowie die dort erhobenen Verkehrs- und Fahrzeugdaten erst zu einer späteren Projektphase verfügbar. Es konnte jedoch auf entsprechende (Trainings-) Daten aus einem früheren Forschungsprojekt zurückgegriffen werden, wodurch die Entwicklungen sowohl des ersten als auch des optimierten KI-Algorithmus planmäßig durchgeführt werden konnte.

AP 3 – Videodetektion

AP 3 wurde maßgeblich vom ISAC allein bearbeitet. Die Arbeiten von ave lagen in diesem AP im Bereich des Wissenstransfers der KI-basierten Videodetektion. Alle Unterarbeitspakete AP 3.1-3.7 des AP 3 „Videodetektion“ werden, analog zu AP 2, in den ersten 24 Monaten der 36-monatigen Projektlaufzeit zweimal durchlaufen. Ziel dieses Vorgehens ist es, möglichst frühzeitig im Projekt erste konkrete Ergebnisse und Algorithmen zu erarbeiten, die, nach entsprechender Implementierung und Tests im Demonstrator, die Basis für den zweiten Durchlauf, die Optimierungsphase, bilden. Dadurch können ggf. nicht ideal gewählte Verfahren und Ansätze frühzeitig erkannt und im weiteren Vorgehen angepasst werden. Darüber hinaus werden die erzielten Ergebnisse der prototypischen Umsetzung vor der finalen Optimierung zusammen mit dem KMU ave eingeordnet und bewertet

Von ISAC im AP 3 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Alle Arbeiten des ISAC aus der ursprünglichen Planung für das AP 3 wurden erfolgreich durchgeführt.

Ein Ziel des Projektes war ein sich gut mit dem schleifenbasierten System ergänzendes System zu entwickeln, um somit vorhandene Alarmer zu bestätigen. Das auf Induktionsschleifen basierte System ist primär in der Lage, langsam fahrende oder stehengebliebene Fahrzeuge zu detektieren.

Abschlussbericht SMaRt

Entsprechend sind es auch diese Anomalien, welche im Fokus liegen. Zum Erkennen von stehengebliebenen Fahrzeugen wurde folgendes System entwickelt:

Es werden Bilder einer Kamera über die letzten 10 – 30 Sekunden gemittelt und somit ein neues artifizielles Bild kreiert. Da sich Fahrzeuge im Normalzustand hinreichend schnell bewegen und der Abstand zwischen Fahrzeugen größer ist, als die Fahrzeuge lang sind, erscheint dieses über die Zeit gemittelte Bild in der Regel von Fahrzeugen befreit (siehe Abbildung 5). Lediglich stillstehende Fahrzeuge oder sich sehr langsam bewegende Fahrzeuge werden sichtbar.

Die innovativen KI-Lösungen finden sich auf drei verschiedenen Ebenen in drei unterschiedlichen Projektphasen wieder:

- Phase 1: Stand-alone KI - auf Sensorebene
- Phase 2: Vernetzte KI (teilweise) - auf Fusions-Ebene
- Phase 3: Vernetzte KI (hauptsächlich) - auf der GUI-/Bedienerebene.

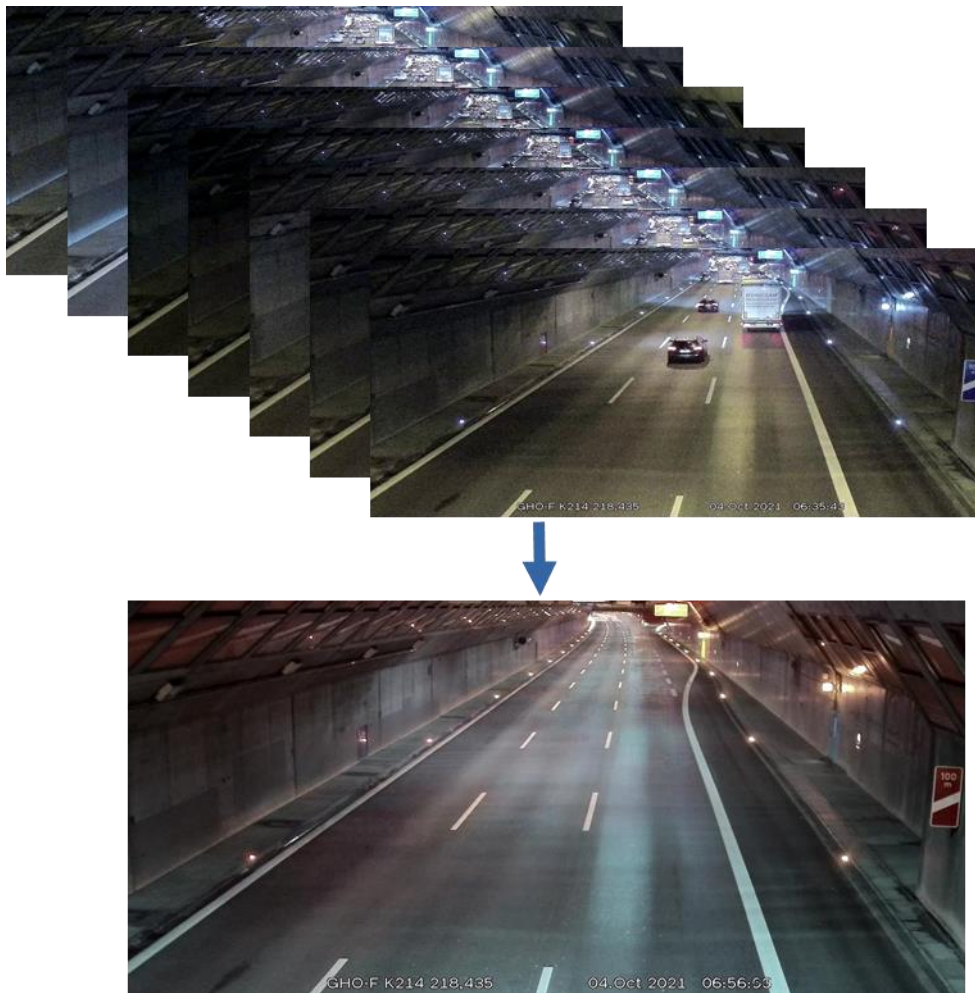


Abbildung 5: Bild-basierte Anomaliedetektion

Während die KI auf der Sensorebene für die beiden verwendeten Sensorsysteme noch unabhängig ist, werden die Ergebnisse auf der Fusionsebene miteinander verbunden. Ziel ist es hier, frühe

Abschlussbericht SMaRt

„Vorwarnungen“ des Intelligent Induction Loop-Systems so schnell wie möglich zu bestätigen oder zu verwerfen, d. h. schneller als es mit dem Intelligent Induction Loop-System allein und unter Verwendung des Videosystems möglich ist. Somit kann Zeit gespart und die Verkehrssicherheit erhöht werden.

Hierbei wurde ein etablierter Anomaliedetektionsalgorithmus für Bilder angewandt. Dieser Anomaliedetektionsalgorithmus kann auch direkt auf den Einzelbildern verwendet werden, um im Bild befindliche Objekte oder Menschen zuverlässig zu detektieren. Da diese aber nicht den vom Schleifensystem entdeckbaren Alarmen entsprechen wurde dies zunächst ausgeklammert. Es lässt sich aber ohne großen Mehraufwand ohne weiteres in echtzeitfähigen Systemen umsetzen. Da weder das Erstellen der „Medianbilder“ noch der nachgeschaltete Anomaliedetektor über untrainierte Neuronale Netze verfügt ist der Datenaufwand vergleichsweise gering. Es wurde ein bestehendes vortrainiertes Neuronales Netz „EfficientNet“ zur Informationsextraktion verwendet, aber nie trainiert. Lediglich die Verteilung dieser Features über den Datensatz musste antrainiert werden und sollte die Varianz der im Tunnel auftretenden Szenarien abdecken (z.B. Tag und Nacht, Stau und Normalverkehr, alle Kameras). Im Projekt wurden einige Entwicklungsarbeit in die Auswertung der Extrahierten Features investiert.

Auf Basis dieser Tätigkeiten wurde das Paper (12th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 2024, Graz) erarbeitet. Hier besitzen die Analysen keinen zeitlichen Kontext, wie es Videodaten naturgemäß haben. Außerdem wurde von Rippel et al. nur eine einzige multivariate Gauß Verteilung vorausgesetzt. Im Kontext dieser Arbeit wurden einige Bemühungen gestartet, darauf aufbauend Veränderungen durchzuführen. Die oben angesprochenen Medianbilder entsprechen im Stau nicht nur einer einzelnen Verteilung, sondern können entweder „leer“ sein oder im Staufall sehr viele stillstehende Fahrzeuge beinhalten. Deutlich seltener kommt es zu einzelnen Stehenbleibern. Im Falle einer Modellierung dieser Zustände mit einer einzelnen Gaussverteilung kann dies bedeuten, dass wenn entweder kein Fahrzeug oder auch 10 Fahrzeuge innerhalb der Verteilung vorhanden sind, dass auch alles dazwischen einen Normalzustand darstellt. Dies konnte auch aufgrund zu geringer Datenmengen einzelner Stehenbleiber zu diesem Zeitpunkt im Projekt nicht bestätigt werden. Der robustere einzelne Gauss, hat daher bei einem sehr kleinen Datensatz die besseren Ergebnisse erzielt. Weitere Forschung könnte dies aber widerlegen. Außerdem wurde verglichen, für jede Kamera eine separate Gauss verteilung zu erstellen oder alle Latent Space Features aller Bilder in einer einzelnen Gauss Verteilung zu aggregieren. Wieder ließ sich aufgrund der geringen Menge an tatsächlichen Anomalien hier keine eindeutige Antwort über eine Empfehlung aussprechen. Die Varianz innerhalb des Normalzustandes ist deutlich niedriger wenn nur Fotos einer einzelnen Kameraperspektive gewählt werden, wodurch Abweichungen von der Norm stärker ins Gewicht treten sollten.

Weiterhin wurde die zeitliche Komponente untersucht. Ziel hiervon ist es die Abnormalität eines Zustands basierend auf dem vorherigen Zustand zu bewerten. Die meisten haben sich als nicht vorteilhaft erwiesen. Eine dynamische Gauss Verteilung basierend auf einem exponential gradient decay war aufgrund der hohen Dimensionalität nicht umsetzbar. Eventuell könnte dies allerdings in Zukunft die beste Lösung darstellen.

Grundlage dieser Entwicklungen ist ein Datensatz von 30 Stunden Videomaterial, welcher zu Projektbeginn von Seiten der Autobahn GmbH bereitgestellt wurde. Diese stammen von 11 Kameras auf einem ca. 500 m langen Streckenabschnitt, aus 5 verschiedenen Zeitintervallen welche in der Länge von 2 h bis zu über 6 h variieren und inkludieren einen Störfall. Dabei wurde der Verkehr durch die Polizei abgebremst und dadurch einen künstlichen Stauwelle erzeugt. Alle Validierungen sind aus der Differenz des Anomaliescores dieses Zeitpunktes in Kontrast zu allen anderen „normalen“ Zeitpunkten

Abschlussbericht SMaRt

entstanden und somit nicht wissenschaftlich auswertbar. Zu einem späteren Zeitpunkt konnte ein Zugriff auf einen Echtzeit Videostream hergestellt werden. Diese ließen sich aber nicht in vergleichbaren Mengen über die Datenverbindung zum Institut transferieren. Weiterhin ließen sich keine sinnvollen Grenzwerte zur Anomaliebewertung setzen, um einen größeren Datensatz zu erzeugen. Um weitere Anomalievideos zu erhalten wurde ein Austausch mit dem Projektpartner AVE etabliert. So konnten im Falle von Alarmen des schleifenbasierten Systems die Videos im Nachgang zu diesem Zeitpunkt verwendet und manuell bewertet werden. Um dies anwenden zu können wurde ein Ringspeicher implementiert, welcher automatisch von allen Kameras über einen Zeitraum von 2 Stunden die Kamerastreams aufzeichnet.

Mit den neu gewonnen Erkenntnissen aus der Analyse des ersten KI-Ansatzes sowie der erneuten Literaturrecherche wurde dann ein optimierter KI-Ansatz entwickelt. Auch dieser wurde wiederum mittels offline- und dann im Anschluss mit online-Daten trainiert und getestet. Die Analyse der erzielten Ergebnisse des optimierten KI-Algorithmus ergab im Vergleich mit den Ergebnissen des ersten KI-Algorithmus eine merkbare Verbesserung. Im direkten Vergleich mit den langjährig optimierten konventionellen Algorithmen ohne KI zeigte sich, dass der optimierte KI-Ansatz in einigen Bereichen bessere und in einigen Bereichen weiterhin schlechtere Ergebnisse erzielte. Eine erneute Optimierung des Algorithmus konnte im Zuge des Forschungsprojektes SMaRt nicht mehr durchgeführt werden. Gegebenenfalls ist aber auch eine Kombination aus beiden, dem konventionellen und dem KI basierten, Algorithmen zukünftig sinnvoll. Dieses konnte aber ebenfalls nicht mehr im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht werden.

Der Wissenstransfer zwischen dem KMU ave und dem ISAC versetzte beide Partner in die Lage, die komplexen Vorgehensweisen und Zusammenhänge von KI-Anwendungen im Bereich der Videodetektion zu erfassen und die Anwendungen auf die Schleifentechnologie zu übertragen. Zusammen mit dem bereits bei ave vorhandenen KI-Wissen sowie dem Spezialwissen im Bereich der Intelligenten Induktionsschleifentechnologie bildete dieses neue Wissen die Grundlage für die Optimierungsvorschläge des Video-Algorithmus.

Abweichungen zur ursprüngliche Vorhabensbeschreibung

Es gab keine wesentlichen inhaltlich Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung und den tatsächlich durchgeführten Arbeiten von ave.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Ertüchtigung des Demonstrators, waren der Demonstrator selbst sowie die dort erhobenen Verkehrs- und Fahrzeugdaten erst zu einer späteren Projektphase verfügbar. Davon waren auch die Video-Daten des ISAC betroffen. Das ISAC konnte jedoch auf bereits vorhandene Video-Daten zurückgreifen, wodurch die Entwicklungen und somit auch der Wissenstransfer sowohl des ersten als auch des optimierten KI-Algorithmus planmäßig durchgeführt werden konnte.

AP 4 – Hybride Detektion

Ziel dieses AP war die Entwicklung eines prototypischen Moduls zur „Hybriden Störfalldetektion“ basierend auf KI. Das AP wurde gemeinsam von der Forschungseinrichtung ISAC und dem KMU ave bearbeitet. Hierbei brachte jeder Partner sein in den AP 2 „Intelligente Induktionsschleifendetektion“ und AP3 „Videodetektion“ gewonnenes KI-Wissen sowie die dort entwickelten KI-Algorithmen ein.

Abschlussbericht SMaRt

Dieses bildete die Grundlage für die Hybride Detektion. Nach der Entwicklung eines ersten Hybriden Detektionsansatzes wurde dieser ebenfalls in einem zweiten Entwicklungsdurchlauf optimiert.

Vom ISAC im AP 4 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Alle ISAC Arbeiten der ursprünglichen Planung für das AP 4 wurden erfolgreich durchgeführt.

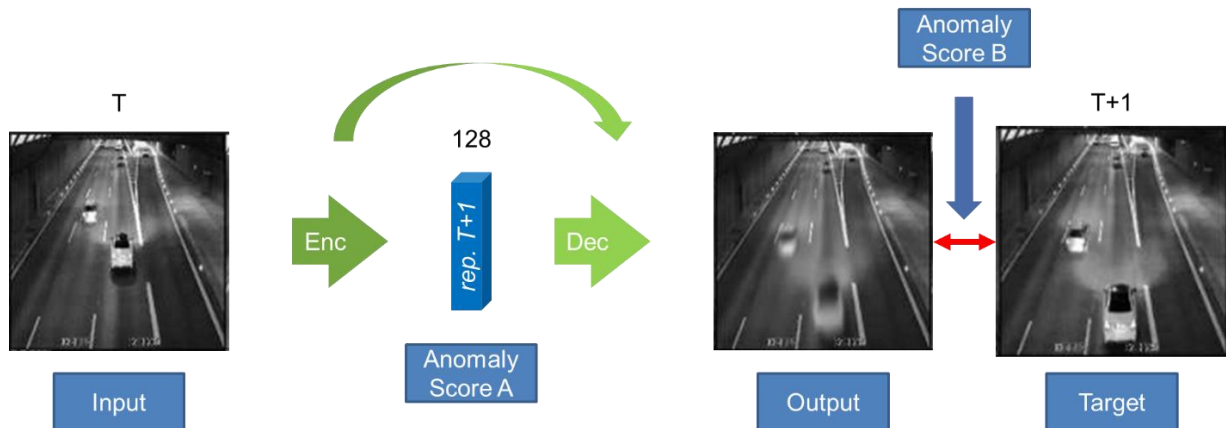
Aufbauend auf dem generierten KI-Wissen sowie den erarbeiteten guten Ergebnissen der vorherigen APs wurde ein Konzept entwickelt, dass eine Kopplung der Video- sowie der Intelligenten Induktionsschleifentechnologie ermöglicht. Ziel war es die jeweiligen Vorteile der Video- und der Intelligenten Induktionsschleifen Technologie zu nutzen. Hierbei mussten zuerst einmal Verfahren und Strategien entwickelt werden, wie und in welchem Umfang diese grundlegend unterschiedlichen Technologien sinnvoll miteinander verknüpft werden konnten.

Die Videodetektion basiert dabei auf einer Pixelanalyse von aufeinanderfolgenden Videobildern, bei der Anomalien an jeder Stelle in der Einhausung (bzw. im Videobild) auftreten können. Das Video System ist dabei in der Lage sehr schnell Videosequenzen hinsichtlich verkehrlichen Anomalien und/oder Auffälligkeiten auswerten zu können, benötigt hierzu aber sehr hohe Rechen- und Datenübertragungskapazitäten. Auch ist die Fehl- und Falschalarmrate höher als bei der intelligenten Induktionsschleifentechnologie.

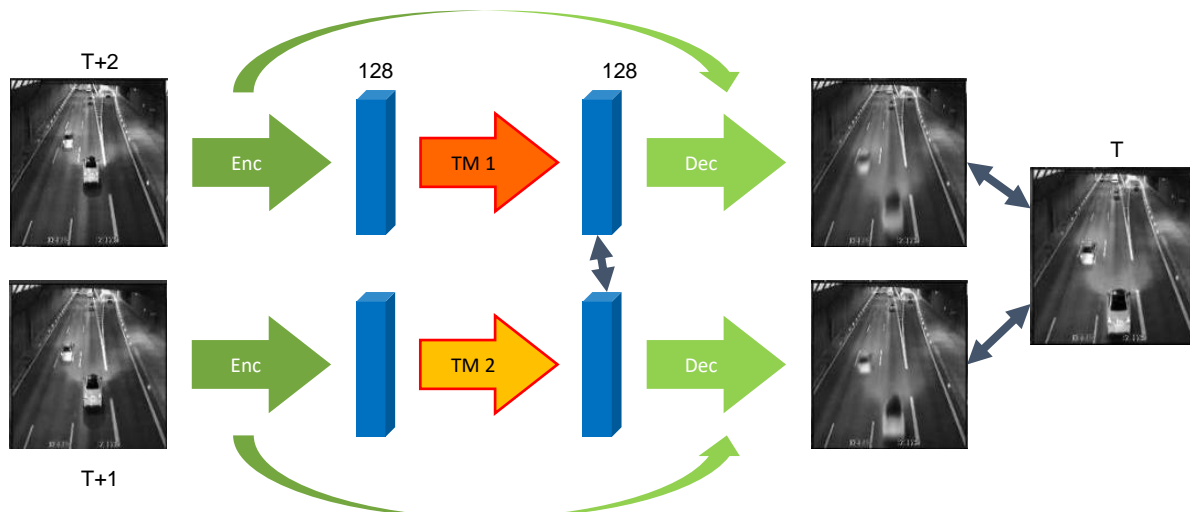
Die Intelligente Induktionsschleifentechnologie erkennt sehr zuverlässig verkehrliche Anomalien und/oder Auffälligkeiten und hat hinsichtlich der Rechen- und Datenübertragungskapazitäten keine hohen Anforderungen. Sie basiert auf der Wiedererkennung von Fahrzeugmustern an benachbarten Messquerschnitten und arbeitet abschnitts- bzw. streckenbezogen. Für die Validierung eines alarmierungswürdigen Störfalls wird immer ein Zeitintervall benötigt, dass mindestens der erwarteten Reisezeit des Fahrzeugs zwischen diesen benachbarten Messquerschnitten entspricht. Die Validierungszeit kann dadurch je nach Verortung des Störfalls innerhalb des Messabschnitts länger dauern als bei der Videodetektion.

Im Rahmen der Arbeiten wurde weiterhin eine alternative Anomaliedetektionsmethodik entwickelt. Diese basierend auf der neuronalen Netzwerkarchitektur des Autoencoders. Die Grundlage dieses Ansatzes ist basierend auf einem Foto, die Position der Fahrzeuge bis zu einer Sekunde später vorherzusagen. Konkret wurde basierend auf einem Ausgangsbild das Bild für ein Zeitintervall später oder früher vorhergesagt. Bei der Architektur des Autoencoders werden zwei neuronale Netzwerke trainiert. Eins ist ein Encoder, welches das Inputbild in eine kleinere Repräsentierung überführt und ein Decoder, welcher basierend auf dieser abstrakten Repräsentierung das Zielbild vorher sagt. Klassischerweise wird dabei dasselbe Bild rekonstruiert, es lassen sich allerdings auch andere, beispielsweise zukünftige Bilder vorher sagen, wenn dies basierend auf den gegebenen Funktionen machbar ist. Obwohl für „Next frame prediction“ üblicherweise Bildersequenzen als Eingabe verwendet werden wurde dies in diesem Projekt bewusst nicht umgesetzt, da dann Informationen über die Geschwindigkeit von Fahrzeugen im Input vorhanden wären. Da eine kontinuierliche aber zu langsame Fahrzeuggeschwindigkeit allerdings einen Störfall darstellen könnte, ist dies nicht verwertbar. Dennoch hat sich herausgestellt, dass ein einzelnes Bild im Kontext eines Autobahntunnels mit geringer Geschwindigkeitsbeschränkung genügt, um die Fahrzeugpositionen hinreichend präzise vorherzusagen. Die Unschärfe im Outputbild ist neben mangelnder Modellgüte auch durch die Unsicherheit bei der Fahrzeuggeschwindigkeit zu erklären.

Abschlussbericht SMaRt



Als Anomaliescore können dabei sowohl die Differenz des Output Bildes zum Ziel Bild verwendet werden als auch die Verteilung der Repräsentierung nach dem Encoder. Ein Problem stellt dabei die Dimension dieser Repräsentierung dar. Ohne sogenannte Skip-Connections geht mit einer kleiner Dimensionalität ebenfalls eine schlechte Vorhersagegüte einher. Um dem entgegenzuwirken können Skip Connections eingeführt werden. Nun nimmt ein Teil der Informationen den direkten Weg von Encoder zum Decoder. Dies ermöglicht eine signifikante Verringerung der Dimensionalität in dem Feature Repräsentierung. Allerdings kann nicht sichergestellt werden, dass sich sämtliche für die Rekonstruktion notwendigen Informationen noch innerhalb dieses Vektors befinden. Um dies zu sicher wurde eine Zwillingearchitektur konzipiert.



Hier wurden erstmalig drei konsekutive Bilder mit je 0,2 Sekunden Abstand extrahiert und verwendet. Dabei werden zwei der Bilder von dem selben Encoder verarbeitet. Entsprechend entstehen zwei Repräsentierungen der jeweiligen Bilder. Nun werden diese Repräsentierungen durch zwei unterschiedliche Neuronale Netzwerke gespeist, mit dem Ziel eine gleiche Repräsentierung vorherzusagen, aus welcher das Zielbild reproduziert wird. Dadurch kann sichergestellt werden, dass Bewegungsrelevante Informationen innerhalb der Repräsentation vorhanden sein müssen.

Abschlussbericht SMaRt

Abweichungen zur ursprüngliche Vorhabensbeschreibung

Es gab keine wesentlichen inhaltlichen Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung und den tatsächlich durchgeführten Arbeiten von ave.

Aufgrund der zeitlichen Verschiebung bei der Ertüchtigung des Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hösbach kam es jedoch zu einer verkürzten Test- und Validierungsphase. So konnte der hybride Algorithmus nicht in dem Maße vor Ort mit online Daten getestet werden, wie es ursprünglich geplant war. Es wurden sehr vielversprechende Ergebnisse mit den offline Daten sowie im weiteren Projektverlauf ebenfalls mit den dann verfügbaren online Daten erzielt.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Skizze wurde ein leistungsstärkerer Server angeschafft, so dass die vorgesehen Rechendauer deutlich reduziert werden konnte.

AP 5 – Demonstrator

In diesem Arbeitspaket widmete das ISAC sich mit dem Verbundpartner ave der Wiederinbetriebnahme und Ergänzung des Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hösbach. Hierbei ging es sowohl um die Ertüchtigung des dort bereits bestehenden Testsystems für die intelligente Induktionsschleifentechnologie als auch um die übergeordnete Koordination der Arbeiten und Absprachen für den Aufbau des Videodetektionssystems. Nach erfolgreicher Wiederinbetriebnahme lagen die Aufgaben des ISAC im Testbetrieb und in der Validierung und Rückkopplung der im Betrieb generierten Daten.

In diesem AP waren neben den beiden Verbundpartnern ISAC und ave auch der assoziierte Projektpartner die Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern beteiligt.

Vom ISAC im AP 5 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Alle ISAC Arbeiten der ursprünglichen Planung für das AP 5 wurden erfolgreich durchgeführt. Das bestehende Testfeld bzw. der Demonstrator auf der A3 in der Einhausung Goldbach-Hösbach (in der Nähe von Aschaffenburg) wurde wieder in Betrieb genommen. Hier wurden wichtige Verkehrsdaten online erhoben und die neu entwickelten KI-Algorithmen im realen Verkehrsablauf getestet. Der Demonstrator umfasste drei Messquerschnitte mit intelligenten Induktionsschleifentechnologie, die zusammen zwei Messabschnitte bildeten. Darüber hinaus konnte auf Daten von den operativen Videokameras der Einhausung zugegriffen werden, die in den Demonstrator-Bereich gerichtet waren. Insgesamt deckte der Demonstrator einen ca. 1 km langen Abschnitt der 2,3 km langen Einhausung in Fahrtrichtung Frankfurt ab.

Abschlussbericht SMaRt

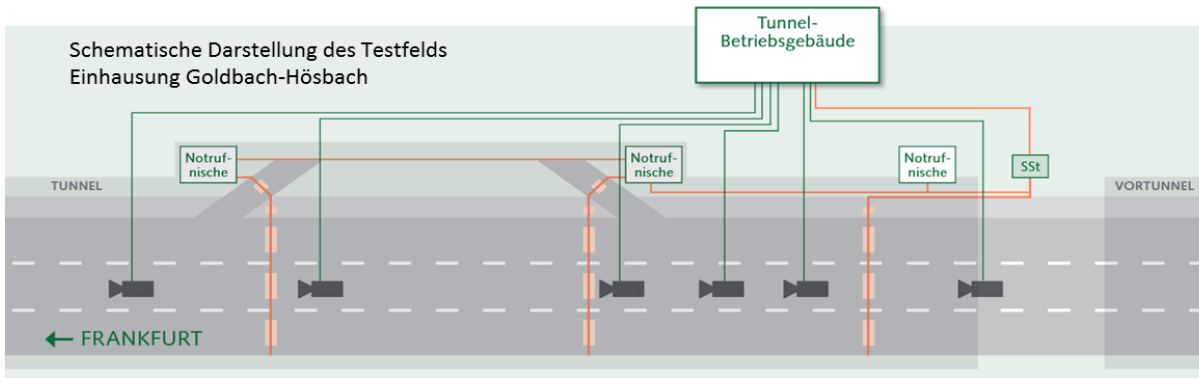


Abbildung 6: Lage und Aufbau des Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hörsbach (Quelle: ave / GoogleMaps)

Die Corona Pandemie führte zu Einschränkungen hinsichtlich der Reiseaktivitäten und physischen Treffen vor Ort. Auch wenn Videokonferenzen vieles auffangen konnten, führte dieses sowie die Tatsache, dass der ursprüngliche Demonstrator doch weiter zurückgebaut war als angenommen, zu einem erhöhten Planungsaufwand sowie zu Verzögerungen bei der Wiederinbetriebnahme. Eine Bestandsaufnahme des Demonstrators zu Projektbeginn ergab, dass die notwendigen Induktionsschleifen sowie der vormalige Einbauraum für die vor-Ort Messtechnik weitestgehend vorhanden und einsatzbereit waren. Die vormals genutzte Datenübertragungstechnik und hier speziell die Datenkabel (Glasfaser) stand aber nicht mehr zur Verfügung, da sie zwischenzeitlich für andere operative Anwendungen genutzt wurden. Hier mussten vom assoziierten Projektpartner, der Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern, physisch neue Glasfaserkabel verlegt und logisch in das bestehende Netzwerk eingebunden werden.

Abschlussbericht SMaRt

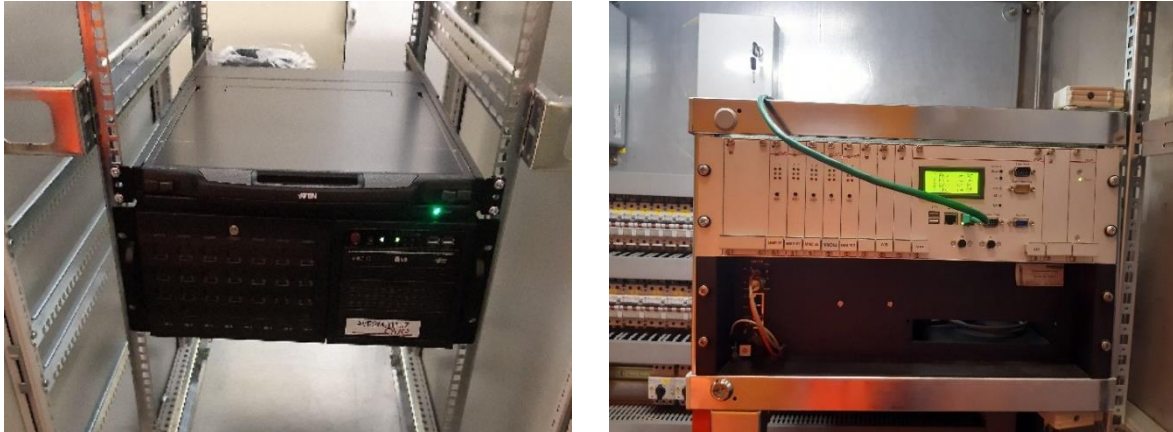


Abbildung 7: Ertüchtigung und Wiederinbetriebnahme des Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hösbach (Quelle: ave)

Die neuen und erhöhten KRITIS Anforderungen, die sich durch die Umstrukturierung der Organisationsstruktur des assoziierten Projektpartners und Autobahnbetreibers der Einhausung Goldbach-Hösbach von der „Autobahndirektion Nordbayern“ hin zur „Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern“ ergaben, führten zu weiteren Verzögerungen. Erweiterte Sicherheitskonzepte musste erarbeitet werden, um den Remote-Zugriff von Aachen aus auf die Systeme vor Ort in der Einhausung zu ermöglichen. Gleiches galt für die Datenanbindung über das Netzwerk vor Ort zwischen dem Server des ISACs und dem von ave. Auch hier musste ein neues Sicherheitskonzept erarbeitet werden. Der Zugriff auf Daten des operativen Videosystem in der Einhausung erforderte schließlich noch ein weiteres noch strengeres Sicherheitskonzept.

Eine Validierung und Rückkopplung im quasi „Realbetrieb“ durch den assoziierten Projektpartner Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern war leider aufgrund der (zusätzlichen) Arbeitsbelastung während der Projektlaufzeit nicht möglich. Die Validierungsarbeit des prototypisch umgesetzten hybriden Störfalldetektionssystems wurde somit von den Projektpartnern ISAC und ave übernommen.

Dabei wurden sehr viele Konfigurationen angewendet und getestet. Durch den Vergleich des ursprünglichen Fahrzeugmusters mit dem rekonstruierten Fahrzeugmuster konnte ein Fehlergrad berechnet werden, der anschließend optimiert werden musste (Abbildung 8). In einem weiteren Schritt wurden die kodierten Muster der unteren Dimensionen der Eingangs- und Ausgangsmessquerschnitte miteinander verglichen und zugeordnet. Auch hier wurde KI eingesetzt.

Abschlussbericht SMaRt

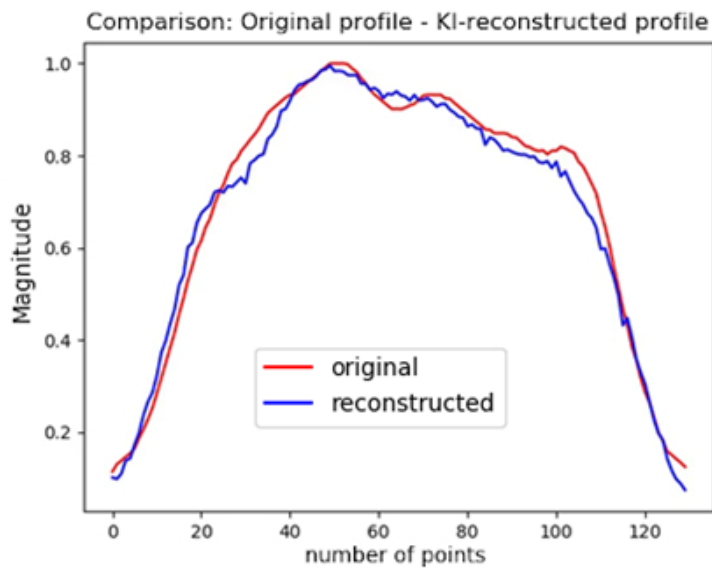


Abbildung 8: Vergleich zwischen ursprünglichem und rekonstruiertem Fahrzeugmuster

Zur Validierung dieser Ansätze und Bewertung (ob sie als Anomaliedetektoren funktionieren) wurde ein syntetischer Datensatz kreiert, bei dem durch Variation der Bildrate unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten simuliert wurden. Da dies allerdings nur eine Art der Anomalien darstellt und insbesondere keine einzelnen Fahrzeuge in der Geschwindigkeit variieren, wurde dieser Datensatz zwar für grobe Entscheidungen als gut genug eingestuft, nicht aber für eine wissenschaftliche Validierung.

Erst spät im Projekt (nach 2.5 Jahren) konnte Zugriff auf einen Datensatz mit von Menschen als „abnormal“ bewerteten Situationen hergestellt werden. Dieser Datensatz musste allerdings zunächst noch aufwendig gefiltert und aufbereitet werden.

Zur Kommunikation wurde gemeinsam mit dem Projektpartner AVE in einem Mini Workshop die konkreten Anforderungen definiert. Dabei wurde eine gRPC-Schnittstelle inklusive des Protokolls festgelegt. Diese Schnittstelle wurde ebenfalls implementiert, sodass der AVE Server jederzeit das videobasierte System fremdstarten kann und zu jedem Moment die AD-Scores des vom ISAC entwickelten Systems auslesen kann.

Abweichungen zur ursprüngliche Vorhabensbeschreibung

Es gab keine wesentlichen inhaltlichen Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung und den tatsächlich durchgeführten Arbeiten von ave. Alle geplanten Arbeiten konnten durchgeführt werden.

Aufgrund von Corona, den neuen strengeren KRITIS Anforderungen sowie den Herausforderungen vor Ort kam es zu Verzögerungen bei der Wiederinbetriebnahme des Demonstrators. Hierdurch verkürzte sich die Test- und Validierungsphase mit den vor Ort erhobenen online Daten. Eine Validierung und Rückkopplung im quasi „Realbetrieb“ durch den assoziierten Projektpartner Autobahn GmbH des Bundes – Niederlassung Nordbayern konnte u. a. aufgrund der zuvor beschriebenen Gründe nicht durchgeführt werden. Die Validierungsarbeit wurde durch die Projektpartner ave und ISAC übernommen. Fehlende bzw. erst später verfügbare online Daten wurden so lange durch vorhandene offline Daten ersetzt, bis die online Daten verfügbar waren. Es kam zu keinen inhaltlichen Einschränkungen aufgrund der beschriebenen Verzögerungen.

Abschlussbericht SMaRt

Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Verbundprojekts wurde seitens der RWTH Aachen University Aufwände in den Positionen 0812 (Beschäftigte E12-E15), 0822 (sonst. Beschäft.-Entgelte), 0831 (Gegenstände bis 800€), 0844 und 0845 (Dienstreisen) sowie 0850 (Gegenstände über 800€) geltend gemacht.

Der überwiegende Großteil der Kosten im Forschungsprojekt SMaRt entfielen am ISAC auf die Personalkosten (Position 0812). Diese vielen bei den zuvor beschriebenen ausgeführten Arbeiten vom ISAC in den entsprechenden AP an.

Weitere Ausgaben erfolgten in den Bereichen Material (Position 0831) und vorhabenspezifischen Abschreibungen (Position 0847). Hierunter vielen Kosten für die Wiederertüchtigung des bestehenden Demonstrators in der Einhausung Goldbach-Hösbach, für notwendige Updates, sowie der Position 0850 zur Anschaffung eines Servers. Die vorhabenspezifische Abschreibung beinhaltete dabei lediglich den Kauf eines neuen Servers, der über die Projektlaufzeit von 3 Jahren vollständig abgeschrieben wurde. Die Materialkosten betrafen Verbrauchsmaterialien, die bei der Ertüchtigung anfielen. Nach Projektende haben weder der Demonstrator (wurde vom ISAC zurück gebaut / die Netzwerkzugänge waren nur temporär) noch die Labormuster einen weiteren Nutzen und stellten auch keinen Wert mehr dar.

Reisekosten (Position 0844 und 0845) sowie sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (Position 0850) fielen in geringem Maße für Projekttreffen, die Wiederinbetriebnahme des Demonstrators sowie die Präsentation des Projektfortschritts und der Projektergebnisse, u. a. auf Messen und Vortragsveranstaltungen, an.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die geleisteten Arbeiten entsprechen dem Forschungsantrag, bauen aufeinander auf und waren zur Erreichung der gesetzten Forschungsprojektziele erforderlich.

Mit der Wiederinbetriebnahme eines bestehenden Testfelds bzw. Demonstrators sowie der Wahl des Projektkonsortiums konnten Arbeitsaufwand und Kosten eingespart werden. Das Konsortium bestand dabei aus einem KMU, einer Forschungseinrichtung und einem Betreiber (letzterer als assoziierter Partner) welches auf ein breites vorhandenes Wissen zurückgreifen und mit der Einhausung Goldbach-Hösbach eine geeignete Infrastruktur kostenneutral zur Verfügung stellen konnte. Durch die Anschaffung eines Servers zur Echtzeitverarbeitung der Videobilder konnte der Datenaustausch sowie die Datenanalyse deutlich verbessert und beschleunigt werden.

Der Umfang der geleisteten Arbeiten entsprach auch rückblickend der Komplexität der gestellten Forschungsfragen. Speziell die bei Antragstellung nicht absehbaren zusätzlichen Rahmenbedingungen, die sich durch die Corona Pandemie sowie den vorherigen Zustand des wieder-in-Betrieb-zunehmenden Demonstrators ergaben, führten zu einem erhöhten Arbeitsaufwand. Dieser erhöhte Arbeitsaufwand überstieg bei ave den geplanten, beantragten und genehmigten Projektaufwand und führte zu einem Mehraufwand im Projekt, der von ave zur Erreichung eines guten Projektergebnisses getragen/übernommen wurde.

Abschlussbericht SMaRt

Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Hinsichtlich des voraussichtlichen Nutzens und der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans stehen für das Institut für Straßenwesen im Wesentlichen die wissenschaftlichen Verwertungen im Fokus. Als Teil der RWTH Aachen wird bestrebt, alle wissenschaftlichen Ergebnisse zu publizieren bzw. auf Fachkongressen vorzustellen. Zudem sollen die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um auch weiterhin in dem Themenfeld der KI zu forschen.

Zur Verbreitung des Wissens werden zudem aktuelle Erkenntnisse aus abgeschlossenen Forschungsprojekten in aktuelle Lehrveranstaltungen (u.a. Straßenplanung II, Machine Learning und Tunnelbetrieb) integriert.

Voraussichtliche Nutzen

Das Institut für Straßenwesen bearbeitet zahlreiche datenbasierte Forschungsprojekte. Hierbei werden unterschiedliche Datenbanken herangezogen und mit neuen Forschungsansätzen analysiert, um bspw. die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Oder den Straßenbetrieb zu verbessern. Dazu gehören auch das Erlernen von sowie der Umgang mit Hightech Schlüsseltechnologien (KI) und innovativen hybriden Detektionsmethoden (Videoanalyseverfahren). Hier bieten die neuen Erkenntnisse aus dem SMART-Projekt dem ISAC viele Möglichkeiten, neue Anwendungen zu erschließen.

Die Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die neu entwickelten KI-Algorithmen mindestens in einigen Bereichen der Störfalldetektion einen guten Beitrag zur Verbesserung der Detektionsqualität liefern können. ave ist bemüht dieses Potential kurz- und mittelfristig zu heben.

Verwertbarkeit des Ergebnisses

Als Teil der RWTH Aachen wird bestrebt, alle wissenschaftlichen Ergebnisse zu publizieren bzw. auf Fachkongressen vorzustellen. Zudem sollen die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um auch weiterhin in dem Themenfeld der KI zu forschen. Innerhalb der Projektlaufzeit sind Zwischenergebnisse bereits auf verschiedenen Fachkongressen (12th International Conference / April 16-18, 2024 und den Aachener Straßenbau und Verkehrstagen / 24./25.11 2022) vorgestellt und veröffentlicht worden.

Zur weiteren Verbreitung des Wissens wurden die erarbeiteten Ansätze und erzielten Ergebnisse bereits in unterschiedliche Lehrveranstaltungen im Master (u.a. Straßenplanung II, Machine Learning und Tunnelbetrieb) integriert.

Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit hat das Projektkonsortium aufmerksam die Forschungsergebnisse und Projekte im Bereich von KI Anwendungen im Tunnel bzw. auf der Autobahn beobachtet. Es sind dem Forschungskonsortium keine Forschungs- und/oder kommerziellen Projekt bekannt, die den in SMaRt geplanten und umgesetzten Ansatz verfolgen. Speziell der Fokus auf die Entwicklung und Kopplung der Intelligenten Induktionsschleifentechnologie sowie der Videodetektion auf Sensorebene ist hier neu und einzigartig.

Sehr wohl sind dem Forschungskonsortium (Forschungs-)Projekte bekannt, die sich mit Forschungsfragen beschäftigen, die auch in Teilen bzw. am Rande von SMaRt eine Rolle spielen. Zu

Abschlussbericht SMaRt

nennen ist hier beispielsweise das europäische über das Förderprogramm Horizon 2020 geförderte Projekt VISIONS (Neural Video Processing and Streaming for Real-time Traffic Monitoring), das sich aber im Wesentlichen auf das Streaming von Videobildern an Kontrollzentren konzentriert, um so Probleme wie Notfälle oder Staus auf Straßen zu erkennen. Als weiteres Beispiel soll hier exemplarisch das vom BMBF geförderte deutsch-österreichische Forschungsprojekt KITT (Künstliche Intelligenz zur Verbesserung der Sicherheit von Tunneln und Tunnelleitzentralen) genannt werden, welches von der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) koordiniert wurde. In KITT wurden neben einer Risikobewertung für den Verkehrsteilnehmer ein weiterer Fokus auf die Risikobewertung hinsichtlich einer Gefährdung des Tunnelbauwerks selbst gelegt.

Erfolgte Veröffentlichungen

Kongresse / Vortragsveranstaltungen inkl. notwendiger Paper:

- ASVT / Setac Tagung (24./25. November 2022 - Aachen)
Störfalldetektion durch Integration von Schleifen und Bilderkennung
(ISAC: Vortrag / ave: Unterstützung bei der Erstellung der Folien)
- Tunnel Safety and Ventilation (12th International Conference / April 16-18, 2024 - Graz)
AI in Roadtunnel – Supporting the Man-in-the-Loop in Roadtunnel (SMaRt)
(ave: Erstellung des Papers und Bearbeitung des Call for papers / ISAC: Vortrag)
- Tunnel Safety and Ventilation 2022 – International Conference (Graz 09./10.05.2022)
- SETAC /ASVT 2022 – Aachener Straßenbau- und Verkehrstage (24./25.11.2022)

Veröffentlichungen:

Philipp Böhnke, Tom Schumann, Dirk Kemper, Alvaro García Hernandez, Supporting the Man-in-the-loop in Roadtunnel - 12th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2024, Graz