Schlussbericht zum Verwendungsnachweis — Teil II

Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger	**Sentics GmbH, Hermann-Münch-Straße 2, 38440 Wolfsburg**
Förderkennzeichen	16KISR016
Vorhabenbezeichnung (Verbund)	Resiliente Kommunikationssysteme für sichere und flexible Produktionssysteme (RePro)
Vorhabenbezeichnung (Teilvorhaben)	Entwicklung von intrinsisch und extrinsisch resilienten Kommunikationssystemen für Produktivumgebungen
Laufzeit	01.01.2023 – 31.03.2026 (ursprünglich bis 31.12.2025, um drei Monate kostenneutral verlängert)
Verbundkoordinator	Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)
Projektträger	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Trotz umfangreicher Arbeitsschutzmaßnahmen verzeichnet die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung jährlich über 36.000 Unfälle mit Personenschäden im innerbetrieblichen Transport. Die Tatsache, dass die Unfallzahlen trotz etablierter Technologien zur Kollisionsprävention in den vergangenen Jahren nicht nachhaltig gesunken sind, weist darauf hin, dass eine neue Generation von Sicherheitssystemen erforderlich ist. Gleichzeitig steigen mit der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung industrieller Produktion die Anforderungen an die zugrundeliegenden Kommunikationssysteme. Sie müssen echtzeitfähig, ausfallsicher, gegen externe Angriffe und interne Störungen resilient und zunehmend auch für sicherheitskritische Funktionen zertifizierbar sein.

Das Gesamtziel des Verbundprojekts RePro bestand darin, Architekturen, Technologien und Verfahren zur Entwicklung resilienter Kommunikationssysteme für Produktionsumgebungen bereitzustellen und diese in zwei industriellen Anwendungsfällen — dem Einsatz autonomer Transportfahrzeuge in der

Automobilproduktion sowie dem Betrieb modularer Fertigungszellen — zu validieren. Das Teilvorhaben der Sentics GmbH fokussierte innerhalb dieses Verbundrahmens die Entwicklung und industrielle Implementierung robuster, resilienter und hoch zuverlässiger drahtloser Kommunikationstechnologien auf Basis eines optischen Echtzeit-Lokalisierungssystems (Optical Real-Time Locating System, oRTLS).

Konkret verfolgte Sentics im Teilvorhaben mehrere ineinandergreifende Teilziele. Zunächst galt es, aus der langjährigen Erfahrung mit produktiven Installationen heraus Anforderungen an eine resiliente Kommunikation in sicherheitskritischen Anwendungsszenarien zu formulieren und in den konsortialen Anforderungskatalog einzubringen. Darauf aufbauend wurde die bestehende, kamerabasierte Sensorsystem-Technologie der Sentics GmbH um Multi-Konnektivität, extrinsische Resilienz und eine sicherheitsorientierte Software-Plattform erweitert. Parallel wurden drei Testumgebungen unterschiedlichen Reifegrads — Entwicklung, Validierung und industrielle Realumgebung — aufgebaut und betrieben, um die Systemlösung unter zunehmend realitätsnahen Bedingungen zu evaluieren. Ergänzend wirkte Sentics an einem dynamischen Zertifizierungsprozess für KI-basierte industrielle Sicherheitsanwendungen mit und setzte die Kommunikation zwischen Infrastruktursensorik, mobilen Einheiten und Umgebungskomponenten als End-to-End-Nachweis eines resilienten Kommunikationsstacks um.

Sentics brachte dabei insbesondere Vorarbeiten aus dem industriellen Einsatz seines optischen Echtzeit-Lokalisierungssystems ein, das bis zu Projektbeginn bereits in mehreren Referenzinstallationen in der Lebensmittel-, Verpackungsmittel- und Konsumgüterindustrie erprobt worden war.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Sentics GmbH (Gründung 2020, Sitz Wolfsburg) hat ein KI-basiertes Sensorsystem für industrielle Sicherheitsanwendungen entwickelt. Die Technologie basiert auf dezentral installierten Kamera-Sensoren mit Kantenverarbeitung (Edge Computing), die Personen, Fahrzeuge und weitere Objekte im industriellen Umfeld datenschutzkonform in Echtzeit detektieren und lokalisieren. Aus den Erkennungen wird unter anderem der von Sentics entwickelte Safety Score abgeleitet, der das Gefährdungsniveau im innerbetrieblichen Transport quantifiziert und dem Anwender eine ortsaufgelöste, datengetriebene Bewertung von Gefahrensituationen ermöglicht.

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns verfügte Sentics über eine Reihe von Vorarbeiten, die für das Teilvorhaben von zentraler Bedeutung waren. Das Unternehmen betrieb produktiv eingesetzte Kamera-Sensoren mit KI-basierter Personen- und Fahrzeugerkennung in mehreren Referenzinstallationen in Europa (Litauen, Niederlande, Spanien). Eine Systemarchitektur zur kamerabasierten Lokalisierung in Kombination mit Schnittstellen zu industriellen Endgeräten — etwa akustische und optische Warnmodule auf Gabelstaplern sowie drahtlose Kommunikation per WLAN — war bereits etabliert. Wissenschaftlich war das Gründungsteam in Kooperation mit der TU Braunschweig und der Universität Twente mit zwei Publikationen zur funktionalen Analyse und Bewertung optischer Echtzeit-Lokalisierungssysteme in Produktionsumgebungen vertreten (Bienia et al. 2022; Thiede et al. 2022). Hinzu kam eine mehrjährige Erfahrung mit datenschutzkonformer Bildverarbeitung, neuronalen Netzen zur Objekterkennung und dem Betrieb der Systeme unter industriellen Randbedingungen wie Staub, stark variierenden Lichtverhältnissen und dynamischen Kameraperspektiven.

Diese Vorarbeiten bildeten die Grundlage, auf der das Teilvorhaben sowohl die Hardware-Basis (Kameraauswahl, Netzwerkinfrastruktur) als auch die Software-Basis (Erkennungsmodelle, Fusionsalgorithmen, Kommunikationsstack) signifikant weiterentwickelte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde mit einer ursprünglich geplanten Laufzeit von 36 Monaten (01.01.2023 – 31.12.2025) in sieben inhaltliche Arbeitspakete (AP1 bis AP7) und ein Querschnitts-Arbeitspaket AP0 (Projektmanagement und Koordination) gegliedert. Sentics war an allen inhaltlichen Arbeitspaketen beteiligt, mit Schwerpunkten in AP4 (Algorithmen der Systemplattform), AP5 (Evaluation für autonome Fahrzeuge) und AP6 (Evaluation in modularen Fertigungszellen). Abbildung 1 zeigt den Arbeitspaketzeitplan des Sentics-Teilvorhabens einschließlich der vier Meilensteine M1 bis M4.

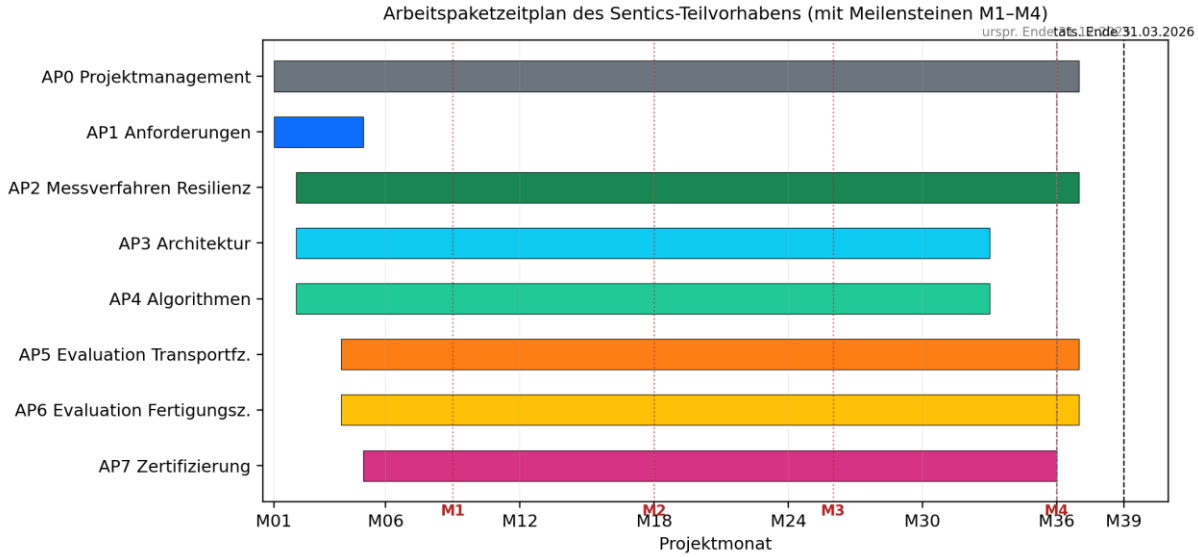

Abbildung 1: Arbeitspaketzeitplan des Sentics-Teilvorhabens im Verbundprojekt RePro. Meilensteine M1 (Projektmonat 9), M2 (M18) und M3 (M26) wurden mit den Sentics-Beiträgen erreicht; M4 markiert den Projektabschluss nach der kostenneutralen Verlängerung.

Der Projektstart 2023 verzögerte sich erheblich durch langwierige Verhandlungen des Kooperationsvertrags zwischen den Konsortialpartnern. Die inhaltlichen Arbeiten begannen daher später als ursprünglich geplant, konnten aber innerhalb des ersten Projektjahres aufgeholt werden. Wesentliche Arbeiten zu AP1 (Anforderungsmanagement), AP2 (Messverfahren), AP3 (Architektur) und AP4 (Algorithmen) wurden in 2023 begonnen oder fristgerecht abgeschlossen.

Während der ersten Projekthälfte schied der als Anwendungspartner vorgesehene Automotive-Partner Kopernikus Automotive aus dem Konsortium aus. Die von Kopernikus übernommenen Inhalte — insbesondere im Bereich der autonomen PKW-Steuerung in der Automobilproduktion (AP5) — wurden Anfang 2024 primär auf die TU Braunschweig und Sentics umverteilt. Hieraus ergaben sich für Sentics erweiterte Verantwortlichkeiten insbesondere im Bereich der optischen Echtzeit-Lokalisierung von PKW in Fertigungsbereichen der Automobilindustrie sowie der Entwicklung der dafür notwendigen Kommunikationsschnittstellen. Als Konsequenz dieser Inhaltsumverteilung und zur Erweiterung der Teststellung um einen weiteren industriellen Anwendungsfall (VW Gläserne Manufaktur Dresden) stellte

Sentics einen Aufstockungsantrag, der im Jahr 2024 bewilligt wurde. Die aufgestockten Mittel ermöglichten insbesondere die Beschaffung zusätzlicher PTZ-Kameras, Netzwerkkomponenten und Server-Hardware für die Außeninstallation in Dresden sowie die Durchführung der zugehörigen Reisen und Feldtests.

Gegen Ende der regulären Projektlaufzeit zeigten sich zwei technische Herausforderungen, die eine kostenneutrale Verlängerung um drei Monate erforderlich machten. Zum einen erwies sich das ursprünglich vorgesehene Kommunikationsprotokoll MQTT für die End-to-End-Kommunikation zwischen Kamera-Edge, Fusionsschicht und Endgeräten als zu latenzbehaftet. In Abstimmung mit dem Konsortium wurde daher eine zusätzliche UDP-basierte Kommunikation evaluiert und integriert, was einen erheblichen Mehraufwand im Bereich der Pipeline- und Protokollentwicklung nach sich zog. Zum anderen verzögerte sich die konsortiale Beschaffung des für die OHLF vorgesehenen Automated Guided Vehicle (AGV), sodass zugehörige Erkennungsmodelle und Kommunikationsschnittstellen erst zum Ende der Projektlaufzeit an realen Daten trainiert und evaluiert werden konnten. Der Antrag auf kostenneutrale Verlängerung wurde bewilligt; die neue Laufzeit endete am 31.03.2026.

Die Meilensteine M1 (Anforderungskatalog, Projektmonat 9), M2 (Systemplattform für autonome Fahrzeuge und modulare Fertigungszellen begonnen, Zertifizierungsprozess angelaufen, M18) und M3 (Architektur vollständig, Algorithmen zur adaptiven Resilienzerhöhung abgeschlossen, M26) wurden mit den jeweiligen Sentics-Beiträgen erreicht. Meilenstein M4 markiert das Ende der verlängerten Laufzeit.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Teilvorhaben knüpfte an mehrere wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien an. Optische Echtzeit-Lokalisierungssysteme haben sich in den vergangenen Jahren als Alternative zu klassischen tag-basierten RTLS-Lösungen (UWB, BLE, RFID) im industriellen Umfeld etabliert. Die wissenschaftlichen Vorarbeiten des Sentics-Gründungsteams (Bienia, Demes, Dreger, Dröder, Thiede 2022; Thiede, Ghafoorpoor, Sullivan, Bienia, Demes, Dröder 2022) zeigten das Potential, aber auch die technischen Herausforderungen der tag-basierten und KI-gestützten optischen RTLS für produktionstechnische Anwendungen auf und bildeten die konzeptionelle Basis für die im Projekt weiterentwickelten Erkennungs-, Kalibrierungs- und Fusionsverfahren.

Auf der Infrastrukturseite ist Edge Computing das dominierende Konzept für latenzkritische Anwendungen, große Datenmengen und Datenschutzanforderungen. Sentics setzt seit Unternehmensgründung auf ein Edge-Konzept, bei dem die Datenverarbeitung möglichst nah an der Datenquelle erfolgt. Die im Projekt adressierten Fragestellungen — Verringerung von Latenz, Bandbreiteneffizienz, lokale Orchestrierung — sind anschlussfähig an die aktuelle Forschung zu industriellem Edge Computing.

Für die zentrale Projektfragestellung — Resilienz drahtloser Kommunikation in Produktionsumgebungen — zeigte eine Bestandsaufnahme zu Projektbeginn punktuelle Lösungen (verschlüsselte Tunnels, redundante Funkstrecken, Fail-Safe-Logik), jedoch keine integrierte Betrachtung des gesamten Kommunikationsstacks vom Sensor über die Fusionsschicht bis zum Aktor unter dem Gesichtspunkt der Resilienz-by-Design. Das Verbundprojekt RePro zielte explizit darauf, diese Lücke konsortial zu schließen und hat auch bis Projektende keinen vollumfänglichen Ansatz am Markt oder in der Forschung

identifizieren können, der die resiliente Verknüpfung diverser Akteure in Industrieumgebungen ganzheitlich adressiert.

Auf Seiten der Detektionsmodelle wurde die Sentics-Erkennungspipeline im Projektzeitraum von YOLOv5 auf eine Kombination aus YOLOv5 (primär) und YOLOv10 (erweiterte Nutzung) umgestellt. Parallel erfolgte die Migration auf NVIDIA DeepStream 7.0 mit NvDCF-Hochgenauigkeitsmodus für das Tracking. Im Bereich der synthetischen Datenerzeugung wurde die Nutzung digitaler Zwillinge (CAD-basierte Trainingsszenen) systematisch ausgebaut, um neue Erkennungsklassen — insbesondere Gabelstapler, Handhubwagen, Paletten und PKW — mit deutlich reduziertem Aufwand für manuelles Datenlabeling zu trainieren.

Parallel zur Projektlaufzeit vollzogen sich wesentliche regulatorische Entwicklungen — insbesondere der EU AI Act und die entstehende Normung zu funktionaler Sicherheit KI-basierter Systeme — die den Bedarf an dynamischen und dokumentierten Zertifizierungsverfahren für industrielle KI-Systeme unterstreichen. Die in AP7 durch das Konsortium — insbesondere TÜV Süd — erarbeiteten Vorgehensweisen zur Erzeugung und Zertifizierung von KI-Modellen in industriellen Anwendungen sind in diesem regulatorischen Kontext zu verorten.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundkonsortium setzte sich aus der TU Braunschweig mit vier Instituten — dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF, Verbundkoordination Prof. Herrmann), dem Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR), dem Institut für Nachrichtentechnik (IfN) und dem Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) — der Sentics GmbH als Technologieanbieter, dem ursprünglich vorgesehenen Anwendungspartner Kopernikus Automotive, der Volkswagen AG als industriellem Endanwender (Referenzstandort Gläserne Manufaktur Dresden) und dem TÜV Süd als Zertifizierungspartner zusammen. Kopernikus Automotive schied während des Projekts aus.

Für die Sentics GmbH ergaben sich mehrere Kooperationsschwerpunkte. Mit den Instituten der TU Braunschweig erfolgte eine enge Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Evaluation der RePro-Systemplattform, bei der Planung und Auslegung der Testumgebung „Forschungsparkhaus“ am Flughafen Braunschweig, bei der gemeinsamen Nutzung der Open Hybrid LabFactory (OHLF) als Forschungsumgebung sowie bei der wissenschaftlichen Begleitung der Algorithmenentwicklung und der Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten. Mit der Volkswagen AG wurde ein mehrtägiger Feldtest auf dem Außenparkplatz der Gläsernen Manufaktur Dresden geplant und durchgeführt; das VW-Standortteam war aktiv in die Anpassung der Pipeline eingebunden, etwa bei der Anforderung zur Aufnahme der Bounding-Box-Dimensionen in die UDP-Ausgabe oder der Übertragung der ArUco-Marker auf ein zweites Testfahrzeug. Mit dem TÜV Süd fanden regelmäßige Arbeitstreffen zur Diskussion von Prozessen und Anforderungskatalogen für die dynamische Zertifizierung KI-basierter Systeme statt, insbesondere mit Blick auf die Dokumentations- und Nachvollziehbarkeitsanforderungen bei der Erzeugung von Detektionsmodellen. Ergänzend nahm Sentics an Netzwerkveranstaltungen der Förderlinie „Resilienz – Widerstandsfähige digitale Systeme“ und der 6G-Plattform teil (AP0).

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Die folgende Darstellung folgt der Arbeitspaketstruktur aus der Vorhabenbeschreibung. Für jedes Arbeitspaket werden Ziel, die von Sentics durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse einschließlich gegebenenfalls aufgetretener Abweichungen von der ursprünglichen Planung beschrieben. Die Architektur des im Projekt weiterentwickelten Systems ist in Abbildung 2 im Überblick dargestellt und wird im weiteren Text an den entsprechenden Stellen detailliert erläutert.

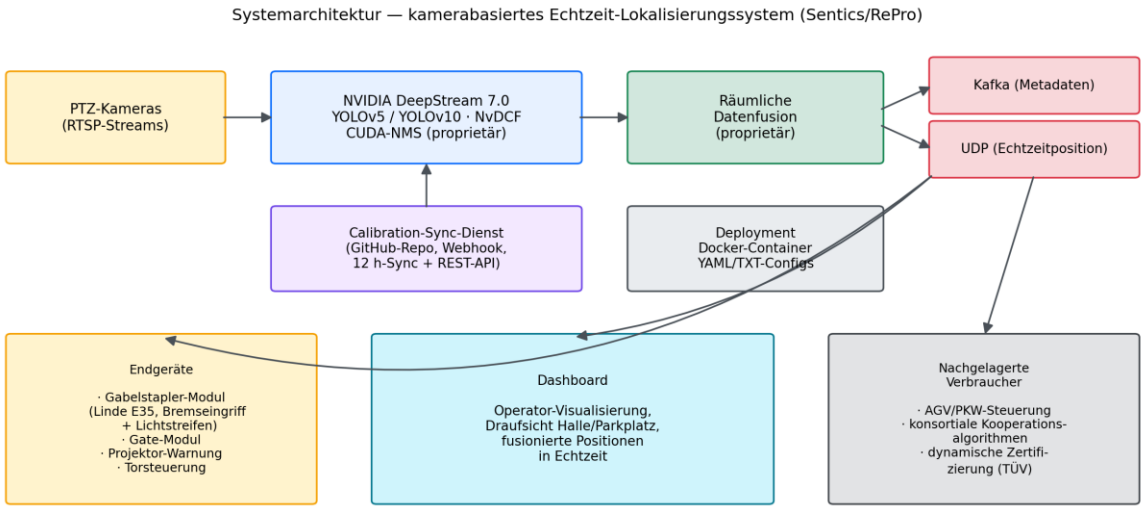

Abbildung 2: Systemarchitektur des kamerabasierten Echtzeit-Lokalisierungssystems. PTZ-Kameras liefern RTSP-Streams an die Edge-Inferenz (NVIDIA DeepStream 7.0 mit YOLOv5/v10 und NvDCF-Tracker). Eine räumliche Fusionsschicht aggregiert Erkennungen aus allen Kameraansichten; die Ausgabe erfolgt über Kafka (Metadaten) und UDP (Echtzeitposition). Der Calibration-Sync-Dienst verteilt extrinsische Kalibrierungsdateien automatisiert.

II.1.1 AP1 — Anforderungen an die Kommunikation

Ziel des Teilvorhabens war die Einbringung der Sentics-Expertise aus dem industriellen Betrieb optischer Echtzeit-Lokalisierungssysteme in die Definition des Anforderungskatalogs an ein resilientes Kommunikationssystem in sicherheitskritischen Produktionsszenarien, insbesondere im Mischverkehr aus Personen und Flurförderzeugen.

Durchgeführte Arbeiten.

Zu Projektbeginn brachte Sentics systematisch Anwendungsszenarien aus bestehenden Referenzinstallationen in der Lebensmittel-, Verpackungsmittel- und Konsumgüterindustrie ein (UAP 1.1). Hieraus wurden Risikokonstellationen im innerbetrieblichen Mischverkehr abgeleitet und auf Kommunikationsanforderungen abgebildet. Im weiteren Verlauf wurden diese Sentics-seitigen Anforderungen mit den Beiträgen der wissenschaftlichen Partner (IBR, IfN) und des Endanwenders Volkswagen zusammengeführt (UAP 1.2). Inhaltlich lagen die Sentics-Schwerpunkte auf Latenzanforderungen für sicherheitskritische Reaktionen im Millisekundenbereich, auf der Multi-Konnektivität zwischen Infrastruktursensorik und mobilen Einheiten, auf Datenschutz- und Verschlüsselungsanforderungen einschließlich IPsec, auf dem Schutz kritischer Systemkomponenten

durch industrierobuste Gehäuse sowie auf den Dokumentationsanforderungen an die Erzeugung KI-basierter Detection-Stacks und Erkennungsmodelle. Die Sentics-spezifischen Anforderungen wurden anschließend in den konsortialen Anforderungskatalog aufgenommen (UAP 1.3) und in mehreren Revisionsschleifen auf Basis der Erkenntnisse aus AP2 bis AP4 sowie aus den Vor-Ort-Erfahrungen in den drei Testumgebungen iterativ verfeinert (UAP 1.4).

Ergebnisse.

Ergebnis des Arbeitspakets ist ein konsolidierter Anforderungskatalog für resiliente Kommunikationssysteme in sicherheitskritischen Produktionsszenarien mit expliziter Berücksichtigung der Sentics-Perspektive. Externe Einflüsse wie Angriffe und interne Einflüsse wie der Ausfall einzelner Systemkomponenten, Umweltbedingungen oder fehlinterpretierte KI-Ausgaben sind systematisch dokumentiert und durch abgeleitete Gegenmaßnahmen hinterlegt. Der Katalog wird fortlaufend gepflegt, Änderungen werden im Konsortium getrackt und geteilt. Meilenstein M1 (Projektmonat 9) wurde erreicht. Wesentliche Abweichungen von der Planung traten in diesem Arbeitspaket nicht auf.

II.1.2 AP2 — Messverfahren für die Bestimmung der Resilienz

Ziel des Teilvorhabens war die Bereitstellung der Sentics-Infrastruktur in der OHLF zur Vermessung und statistischen Charakterisierung der Netzwerkinfrastruktur unter produktionsnahen Randbedingungen sowie die Mitwirkung bei der Verbesserung der Leistungsfähigkeit.

Durchgeführte Arbeiten.

Sentics baute in der OHLF eine Messumgebung auf, in der die Sentics-Kamera-Infrastruktur produktionsnah betrieben und systematisch vermessen werden konnte (UAP 2.2). Entlang des gesamten Pfades von der Kameraerfassung über die KI-Inferenz bis zur Ausgabe an die Endgeräte wurden Systemlatenzen, Latenzvarianzen und Paketverlustraten unter verschiedenen Last- und Netzwerkbedingungen ermittelt. Das wichtigste Ergebnis dieser Vermessungen bestand in der Feststellung, dass das ursprünglich vorgesehene Kommunikationsprotokoll MQTT für den Anwendungsfall — zeitkritische Übertragung von Objekterkennungs-Metadaten mit niedriger einstelliger Millisekunden-Latenz — nicht ausreichend geeignet ist. In Abstimmung mit dem Konsortium erfolgte daraufhin die Spezifikation und Implementierung einer zusätzlichen UDP-basierten Ausgangsschnittstelle für die fusionierten Lokalisierungsdaten (UAP 2.3). Im Anschluss wurde die Netzwerkinfrastruktur nach Umstellung auf UDP sowie nach Einführung verschiedener Kommunikationsarchitekturen (Ethernet, WiFi, 5G, LTE) in OHLF und Forschungsparkhaus erneut vermessen und hinsichtlich der Resilienzanforderungen bewertet (UAP 2.4).

Ergebnisse.

Neben der etablierten Messarchitektur für Leistungsindikatoren resilienter Kommunikationssysteme und der konsortialen Bereitstellung der Messdaten ist das wichtigste operative Ergebnis dieses Arbeitspakets die Umstellung der Echtzeit-Ausgabe der Sentics-Pipeline auf UDP. Diese Umstellung ist direkt in die Systemplattform eingeflossen und stellt sicher, dass die im Anforderungskatalog festgelegten Latenzanforderungen erfüllt werden. Der hieraus resultierende Mehraufwand war eine der beiden Begründungen für die kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens.

II.1.3 AP3 — Systemplattform für resiliente Kommunikation: Architektur

Ziel des Teilvorhabens war die Einbringung der Sentics-Expertise aus dem industriellen Betrieb von Sensor-Systemen in die Entwicklung der Gesamtarchitektur des resilienten Kommunikationssystems.

Durchgeführte Arbeiten.

Sentics sichtete und bewertete gemeinsam mit den wissenschaftlichen Partnern aktuelle Entwurfsverfahren für resiliente Kommunikationsschnittstellen im Bereich industrieller Sensor-Systeme (UAP 3.1) und brachte die Erfahrung aus produktiv betriebenen Kamerasystemen in die Diskussion ein. Bei der Entwicklung von Werkzeugen für intrinsische Resilienz (UAP 3.2) lag der Schwerpunkt auf fehlertoleranter Konfiguration der Kamera-Edge-Knoten, auf Wiederanlaufstrategien nach Einzelkomponentenausfall und auf der Absicherung der Zustandshaltung im Tracker; die Sentics-Infrastruktur in der OHLF wurde für die experimentelle Validierung bereitgestellt. Bei der extrinsischen Resilienz (UAP 3.3) brachte Sentics Erfahrungen mit industriellen Kommunikationstechnologien (WLAN-basierte Kommunikation zu Gabelstapler-Modulen, zunehmender Einsatz von 5G- und LTE-Strecken) sowie die zugehörigen Netzwerk- und Funkstrecken ein. Die Sentics-seitige Referenzarchitektur — kamerabasierte Erfassung, Edge-Inferenz, zentrale Fusion, Multi-Kanal-Ausgabe — diente in der Diskussion der Gesamtarchitektur (UAP 3.4) als Bezugsmodell.

Ergebnisse.

Die im Konsortium erarbeiteten generischen Architekturkonzepte zur Erzeugung einer resilienten Kommunikation in Produktionssystemen berücksichtigen den Einsatz kamerabasierter Sensor-Systeme explizit. Der Sentics-Architekturbeitrag bestand im Aufbau einer sequenziellen Verarbeitungspipeline, bestehend aus Rohvideoerfassung über RTSP, KI-Inferenz auf NVIDIA DeepStream 7.0, räumlicher Fusion über alle Kameraansichten und Ausgabe über Kafka (Metadaten) sowie UDP (Echtzeitposition); das Deployment erfolgt containerisiert via Docker mit YAML- und TXT-Konfigurationsdateien. Ergänzend entwickelte Sentics einen Calibration-Sync-Dienst, der die extrinsischen Kalibrierungsdateien aus einem zentralen GitHub-Repository in die DeepStream-Container verteilt. Die Synchronisierung erfolgt periodisch alle zwölf Stunden, auf Abruf über eine REST-API und sofort auf GitHub-Webhook-Events; Aktualisierungen werden DeepStream über ein Konfigurationsflag signalisiert. Die Architektur ist in Abbildung 2 dargestellt. Meilenstein M3 (Architektur vollständig, Projektmonat 26) wurde mit den Sentics-Beiträgen erreicht.

II.1.4 AP4 — Systemplattform für resiliente Kommunikation: Algorithmen

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung und Integration von Algorithmen zur adaptiven Erhöhung der Resilienz durch Multi-Konnektivität mit spezifischem Fokus auf die Anforderungen der Automobilproduktion und unter Einbeziehung der Sentics-Sensor-Plattform.

Durchgeführte Arbeiten.

Im Rahmen der Software-Plattform und ihrer Spezifikation (UAP 4.1) erarbeitete Sentics detaillierte Anforderungen für den sicherheitsrelevanten Einsatz des Echtzeit-Lokalisierungssystems als Bestandteil einer resilienten Kommunikationsplattform. Die Multi-Konnektivität zwischen Sensor-Netzwerken und mobilen Entitäten wie Gabelstaplern, automatisierten Hubwagen und PKW wurde konzeptionell ausgelegt und implementiert. Durch die Aufstockung konnten zusätzlich die Spezifikationen für die

wechselseitige Kommunikation mit PKW in der Automobilproduktion sowie die Anforderungen an Störerkennung und Fail-Safe-Strategien erarbeitet werden. In UAP 4.2 und UAP 4.3 erfolgte die Integration zentralisierter sowie verteilter Algorithmen in die Sentics-Systemarchitektur. Zu den wesentlichen Bestandteilen gehören die Multi-Kamera-Fusion, die Fahrzeug- und Personenerkennungen aus allen Kameras zu einheitlichen, räumlich konsistenten Positionen über den gesamten Erfassungsbereich auflöst, die ArUco-basierte Fahrzeugidentifikation mit nahtlosem Umschalten zwischen markerbasierter und geschwindigkeitsbasierter Gierwinkelschätzung, die Trackerkonfiguration mit NvDCF im Hochgenauigkeitsmodus sowie ein CUDA-beschleunigter Non-Maximum-Suppression-Schritt zur Beschleunigung der Inferenz. Die KI-Edge-Sensoren wurden für Versuchsdurchführungen gefertigt, weiterentwickelt und bereitgestellt. In UAP 4.4 erfolgte die Bewertung der Leistungsindikatoren im realen produktionstechnischen Betrieb in der OHLF und im Forschungsparkhaus, mit besonderem Fokus auf den Einsatz von Transportfahrzeugen.

Ergebnisse.

Das Detektionsmodell wurde um die Klassen Mensch, Gabelstapler, Paletten, Handhubwagen und weitere Fahrzeuge (darunter PKW für die Anwendungsumgebung Automobilproduktion) erweitert. Die Detektions-Pipeline basiert nun auf einer Kombination aus YOLOv5 (primär) und YOLOv10, ergänzt durch ein benutzerdefiniertes CUDA-beschleunigtes Non-Maximum-Suppression. Die Datenfusionsschicht oberhalb von DeepStream aggregiert Fahrzeugerkennungen aus allen Kameras räumlich konsistent; die Algorithmen zur Störerkennung und Überlappungsfreiheit im Mischverkehr von Personen und Transportfahrzeugen sind implementiert. Ein bedeutsamer methodischer Schritt war der systematische Einsatz synthetischer Trainingsdaten: Reale Umgebungsbilder der Einsatzumgebung werden mit digitalen CAD-Modellen zu erkennender Objekte kombiniert, wodurch neue Erkennungsmodelle in kurzer Zeit erstellt und bei Domänenänderungen leicht adaptiert werden können. Der manuelle Aufwand für das Datenlabeling wurde dadurch signifikant reduziert. Meilenstein M3 (Algorithmen zur adaptiven Resilienzerhöhung abgeschlossen, Projektmonat 26) wurde erreicht. Die bereits in AP2 erwähnte Umstellung des Kommunikationsprotokolls auf UDP wirkte sich auch auf AP4 aus, insbesondere bei der Datenfusion und der Ausgangsschnittstelle. Die ArUco-basierte Fahrzeugidentifikation erwies sich in einer der Realumgebungen (VW Gläserne Manufaktur Dresden, siehe AP5) als nicht ausreichend robust und ist daher als experimentelles Ergebnis einzuordnen.

II.1.5 AP5 — Evaluation der Systemplattform für autonome (Transport-)Fahrzeuge

Ziel des Teilvorhabens war die Evaluation der entwickelten Systemplattform auf Basis eines Vehicle2Production-Anwendungsfalls, die Prüfung der Übertragbarkeit auf die Großserienfertigung sowie die Entwicklung einer KI-basierten Pipeline zur Echtzeit-Lokalisierung von PKW und Fahrzeugen in der Endmontage der Automobilproduktion. Infolge des Ausscheidens des Partners Kopernikus nahm der Sentics-Anteil an diesem Arbeitspaket zu.

Durchgeführte Arbeiten.

Die Use Cases wurden gemeinsam mit den Partnern TU Braunschweig (IfF) und Volkswagen definiert; ein geeignetes fahrerloses Transportsystem wurde eingegrenzt und die Anforderungen aus den Realumgebungen an die Modellumgebungen spezifiziert (UAP 5.1). Der Kern der operativen Arbeit bestand im Aufbau und Betrieb von drei Testumgebungen unterschiedlichen Reifegrads (UAP 5.2; siehe

Abbildung 3). Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Kamerastandorte der Installation am Außenparkplatz der VW Gläsernen Manufaktur Dresden.

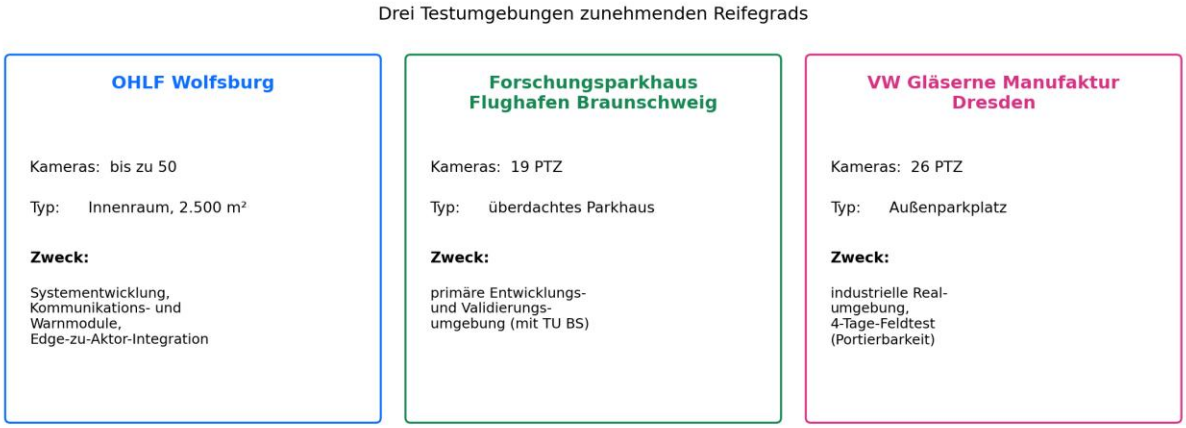

Abbildung 3: Drei Testumgebungen zunehmenden Reifegrads — von der Systementwicklung in der OHLF über die Validierung im Forschungsparkhaus Flughafen Braunschweig bis zum Feldtest in der industriellen Realumgebung VW Gläserne Manufaktur Dresden.

Abbildung 4: Kamerastandorte der Sentics-Installation auf dem Außenparkplatz der VW Gläsernen Manufaktur Dresden. Grüne Marker kennzeichnen die PTZ-Kameras, rote Marker die Access-Points, der gelbe Marker die 5G-Antenne. Die farbigen Bereiche markieren die Datenverteilbereiche (UVS23/UVS02/LVR04/UVS08).

Die erste Testumgebung, die Open Hybrid LabFactory (OHLF) in Wolfsburg, ist eine ca. 2.500 m² große Forschungsumgebung, die variabel mit bis zu 50 Kamera-Sensoren (Mischung fester Kameras und PTZ-Kameras) ausgestattet wurde. Hier können beliebig viele Personen, ein Gabelstapler (Linde E35), ein automatisierter Hubwagen und Paletten erkannt werden. Neben der Objektposition in einem referenzierten Koordinatensystem wird auch die Geschwindigkeit abgeleitet. Es wurden verschiedene Kommunikationsarchitekturen (Ethernet, WiFi, 5G, LTE) implementiert und untersucht. Die zweite Testumgebung, das Forschungsparkhaus am Flughafen Braunschweig, diente als primäre Testumgebung für die Entwicklung und Abstimmung der gesamten Pipeline vor der Integration an externen Standorten. Hier kamen 19 PTZ-Kameras des Typs Dahua 404DB-GNY in einem überdachten Parkhaus (Innenbereich) zum Einsatz; die Kooperation erfolgte in enger Abstimmung mit der TU Braunschweig. Die dritte Testumgebung war die VW Gläserne Manufaktur in Dresden, wo Sentics in einem viertägigen Feldtest 26 PTZ-Kameras auf einem Außenparkplatz installierte und betrieb, um die Systemintegration in einer neuen, unabhängigen Umgebung und die Standortübertragbarkeit der Systemlösung zu prüfen.

In UAP 5.3 steuerte Sentics über die API und die Kommunikationsschnittstellen Fahrzeugposition, Geschwindigkeit, Bounding-Box-Dimensionen und bei ArUco-Sichtbarkeit eine eindeutige Fahrzeug-ID sowie den Gierwinkel bei, sodass die autonomen Steuerungsansätze der Partner diese Informationen konsumieren können. Die Sentics-Kooperationsstrategie (UAP 5.4) basierte auf der Bereitstellung der Infrastruktur-Sensorik als gemeinsame Umgebungsrepräsentation, auf der die Partner ihre Priorisierungs- und Steuerungsalgorithmen aufsetzen. Die Resilienz der Sentics-Komponenten wurde in den drei Testumgebungen evaluiert (UAP 5.5); die Randbedingungen zu Kalibrierung, Erkennung, räumlicher Lokalisierung, Fahrzeug-ID und Kameraabdeckung wurden dokumentiert und bewertet. Abschließend wurde die in OHLF und Forschungsparkhaus entwickelte Pipeline in die Realumgebung der VW Gläsernen Manufaktur Dresden transferiert (UAP 5.6), einschließlich Netzwerkaufbau, Server-Setup, Konfiguration und Inbetriebnahme aller 26 Kameras sowie der Anpassung der Pipeline an die Außen-Randbedingungen.

Ergebnisse.

Grundlegendes Systemdesign, Kamerakalibrierung, Fahrzeugerkennung und räumliche Lokalisierung funktionierten zuverlässig und standortübergreifend; die Übertragbarkeit der Systemlösung von einer internen Entwicklungsumgebung auf eine industrielle Realumgebung wurde damit nachgewiesen. Zusätzlich wurden vier Testläufe von jeweils zehn Minuten aufgezeichnet und für die zukünftige Entwicklung gesichert. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Ergebnisse der 4-Tage-Kampagne in Dresden zusammen. Als primärer Anschlussbedarf wurde die ArUco-basierte Fahrzeugidentifikation identifiziert, die in der Außenumgebung unter variablen Belichtungsbedingungen und bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten nicht ausreichend robust war.

Bereich	**Ergebnis**
Kamerasystem	Alle 26 Kameras funktionierten zuverlässig
Kamerakalibrierung	Erfolgreich; das Sentics-Kalibrierungswerkzeug arbeitete über den gesamten Einsatz zuverlässig

Fahrzeugerkennung	Zuverlässig
Räumliche Lokalisierung	Gut
ArUco-basierte Fahrzeug-ID	Unzuverlässig; eindeutige Fahrzeug-ID fiel bei Verdeckungen, Belichtungsabwägungen und höheren Geschwindigkeiten häufig aus
Kameraabdeckung	Toter Winkel zwischen zwei Kamerapositionen durch Müllcontainer verdeckt; keine Kamera in dieser Lücke
Abschließender Integrationstest	Nicht abgeschlossen — Netzwerkprobleme auf Seiten der TU Braunschweig während des Tests

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der 4-Tage-Feldtestkampagne an der VW Gläsernen Manufaktur Dresden.

In der Gesamtbewertung trug die Übernahme zusätzlicher Inhalte nach dem Ausscheiden des Partners Kopernikus ressourcenseitig durch den Aufstockungsantrag und inhaltlich durch die Dresden-Installation signifikant zum Nachweis der Übertragbarkeit bei. Die Verzögerung der konsortialen AGV-Beschaffung trug zur kostenneutralen Verlängerung bei, ermöglichte letztlich aber die reale Datenerhebung und die Durchführung des Dresden-Feldtests.

II.1.6 AP6 — Evaluation in modularen Fertigungszellen und Matrixproduktionen

Ziel des Teilvorhabens war die Evaluation der Systemplattform im Kontext modularer Fertigungszellen mit Schwerpunkt auf den Rahmenbedingungen der optischen Echtzeit-Lokalisierung und auf der Integration von Kommunikations- und Warnmodulen.

Durchgeführte Arbeiten.

In UAP 6.1 wurden die Anwendungen in der OHLF geplant und konzeptioniert, mit Fokus auf die Rahmenbedingungen der optischen Echtzeit-Lokalisierung (Kameraauswahl und -platzierung, Ausleuchtung, Netzwerkinfrastruktur). In UAP 6.2 erfolgte die variable Ausstattung der OHLF mit bis zu 50 Kamera-Sensoren — sowohl klassischen Kameras mit fester Perspektive als auch PTZ-Kameras mit dynamischer Perspektive. Letztere haben sich in Räumlichkeiten mit dynamischem Umfeld, in dem häufig eine Perspektivanpassung notwendig ist, als besonders sinnvoll erwiesen. UAP 6.3 adressierte die Modellumgebung und Simulationsentwicklung; der Sentics-Beitrag lag in der realen Testumgebung mit synthetisch trainierten KI-Modellen, die eine schnelle Anpassung an Domänenänderungen erlauben, und in der Nutzung digitaler Zwillinge der Einsatzumgebung für das Vortraining. In UAP 6.4 erfolgte die Bewertung der intrinsischen und extrinsischen Resilienz in den beiden Anwendungen entlang der gesamten Kette von der Kamera bis zum Aktor.

Ergebnisse — Kommunikations- und Warnmodule in der OHLF.

Über die Sensorik hinaus wurden mehrere Kommunikations- und Warnmodule in die OHLF integriert, die den Nutzen der Sentics-Plattform als Bestandteil einer resilienten Kommunikationsarchitektur praktisch demonstrieren. Ein Gabelstapler-Modul auf einer Linde E35 reduziert die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs bei drohendem Zusammenstoß mit Personen, anderen Fahrzeugen oder kritischer

Infrastruktur; zusätzlich wird der fahrenden Person über einen Lichtstreifen signalisiert, dass eine Gefahrensituation vorliegt. Das Modul bezieht die Umgebungsinformationen direkt aus der Sentics-Fusionsschicht. An einem ausgewählten Torbereich kommuniziert ein Gate-Modul über einen Lichtstreifen mit Personen und Fahrzeugen; wenn sich eine Person im Tordurchgang befindet und sich ein Transportfahrzeug nähert, wird der Person eine visuelle Warnung gegeben, komplementär zur Warnung an die Fahrzeugführer. Ein Projektor warnt Personen vor sich nähernden Transportfahrzeugen, wodurch eine Verkehrssteuerung in Bereichen realisiert wird, in denen sich Personen- und Flurförderverkehr kreuzen. Schließlich wurden die Hallentore ins Sentics-System integriert; exemplarisch wurde umgesetzt, dass Hallentore nur bei sich nähernden Personen reagieren und sich öffnen, bei stehenden Personen im Randbereich jedoch verschlossen bleiben. Das Dashboard visualisiert die fusionierten und geclusterten Fahrzeug- und Personenpositionen in Echtzeit und dient als bedienergestützte Oberfläche für den Systembetrieb. Wesentliche Abweichungen von der Planung traten in diesem Arbeitspaket nicht auf.

II.1.7 AP7 — Zertifizierung

Ziel des Teilvorhabens war der Beitrag zur Erarbeitung von Vorgehensweisen für die Zertifizierung KI-basierter industrieller Sicherheitsanwendungen, insbesondere die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Erzeugung von Erkennungsmodellen.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.

Sentics brachte seine interne Vorgehensweise bei Datenerhebung, Labeling — einschließlich synthetischer Daten —, Training, Validierung und Produktivsetzung in die konsortiale Spezifikation der Prozesse und des Anforderungskatalogs für die dynamische Zertifizierung ein (UAP 7.1). An der Spezifikation von Sicherheitsprofilen für den Betrieb der Sentics-Komponenten in sicherheitskritischen Kontexten (UAP 7.2) wirkte Sentics mit. Im Rahmen der technischen Integration einer dynamischen Evaluierungs-Engine (UAP 7.3) stellt Sentics Metadaten und Telemetrie aus der Produktivpipeline — Kalibrierungsstände, Modellversionen, Detektions-Metadaten — bereit, die durch eine solche Engine konsumiert werden können. Die Überführung in konsortiale Zertifizierungsstrategien und Beiträge zu Standardisierungsinitiativen (UAP 7.4), insbesondere im Kontext der 6G-Plattform, wurden ebenfalls adressiert. Ein dokumentierter Sentics-Prozess zur Erstellung von KI-Erkennungsmodellen in industriellen Anwendungen — abgestimmt auf die Anforderungen einer dynamischen Zertifizierung — liegt vor und ist Teil des konsortialen Anforderungskatalogs. Meilensteinbeitrag M2 (Prozessdefinition für Zertifizierung begonnen) wurde geleistet. Wesentliche Abweichungen von der Planung traten in diesem Arbeitspaket nicht auf.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird als Anlage 1 (Formular 0640c) und über das profi-Online-Formular eingereicht. Der mit Abstand größte Mittelanteil entfiel auf die Personalkosten für die Arbeiten in AP1 bis AP7 mit den Schwerpunkten Computer Vision, Systems Engineering und Feldinstallationen. Reisekosten fielen für Netzwerkveranstaltungen der Förderlinie und der 6G-Plattform, für Konsortialtreffen mit TU Braunschweig und Volkswagen sowie für die mehrtägigen Feldtestreisen (Forschungsparkhaus Braunschweig, Gläserne Manufaktur Dresden) an. Sachmittel wurden insbesondere für PTZ-Kameras vom Typ Dahua 404DB-GNY, PoE-Switches, Netzwerkschrank-Komponenten,

Anwendungsserver, die technische Kommunikationsarchitektur und eine Cloud-Entwicklungsumgebung eingesetzt. Ein Teil dieser Sachmittel wurde durch den 2023/2024 bewilligten Aufstockungsantrag abgedeckt; die konkrete Mittelverschiebung wurde mit dem Projektträger abgestimmt und dokumentiert. Die konkreten Beträge werden im Anhang zum zahlenmäßigen Nachweis ausgewiesen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Teilvorhaben geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele notwendig und in ihrem Umfang angemessen. Der Sensor-Edge-Teil — KI-Modelle, Tracker, Kalibrierung — bildet die Grundlage, ohne die eine resiliente Kommunikation zwischen Infrastruktursensorik und mobilen Einheiten nicht möglich wäre: ohne belastbare Erkennung und Lokalisierung lässt sich keine belastbare Warn- oder Eingriffslogik aufsetzen. Die Weiterentwicklung der Systemarchitektur — Calibration-Sync, Fusion, UDP-Ausgabe, containerisiertes Deployment — war notwendig, um das System aus der Einzelinstallation in den Betrieb über mehrere, zunehmend industrielle Umgebungen zu überführen. Die Einrichtung und der Betrieb der drei Testumgebungen waren notwendig, um die Systemleistungsfähigkeit und -portabilität unter zunehmend realitätsnahen Bedingungen nachzuweisen. Die Übernahme zusätzlicher Inhalte nach dem Ausscheiden des Partners Kopernikus war notwendig zur Erhaltung der Zielerreichung im Gesamtverbund und wurde durch die bewilligte Aufstockung ressourcenseitig abgedeckt. Die Umstellung auf UDP schließlich war notwendig zur Erfüllung der im Anforderungskatalog festgelegten Latenzanforderungen und rechtfertigte den Mehraufwand, der zur kostenneutralen Verlängerung führte. In ihrem Umfang orientierten sich die Arbeiten eng an der im Antrag und im Aufstockungsantrag dargestellten Ressourcenplanung.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Eine ausführliche Darstellung der Verwertbarkeit liegt als separate Kurzfassung zum aktualisierten Verwertungsplan bei. Zusammenfassend ergibt sich das folgende Bild: Das im Projekt weiterentwickelte optische Echtzeit-Lokalisierungssystem adressiert einen großen industriellen Anwendungsmarkt. Das verarbeitende Gewerbe in Deutschland beschäftigt ca. 7,4 Millionen Personen und weist mit rund 27,5 % aller meldepflichtigen Unfälle das höchste Unfallrisiko unter den Wirtschaftszweigen auf. Unfälle mit Transportfahrzeugen — allein über 36.000 meldepflichtige Gabelstapler-Unfälle pro Jahr in Deutschland — sind eine der Hauptursachen für mittlere und schwere Unfälle. Die Projektergebnisse erweitern die adressierbaren Anwendungsgebiete über die Arbeitssicherheit hinaus auf Inventurprozesse, Arbeitsergonomie-Bewertung, Nachverfolgungsaufgaben und Flottensteuerung. Während der Projektlaufzeit wurde das Projekt unter anderem auf der LogiMAT 2024 in Stuttgart präsentiert; der dortige Anwenderkreis bestätigte das hohe Interesse an einer resilienten, rein bildbasierten und datenschutzkonformen Lokalisierungslösung. Auf wissenschaftlich-technischer Seite bildet die im Projekt entstandene Systemplattform die Basis eines neuen Systems zur optischen Echtzeit-Lokalisierung mit expliziter Berücksichtigung von Resilienzanforderungen. Die Erkenntnisse zu den Vor- und Nachteilen einzelner Protokolle (MQTT vs. UDP), zur Standort-Portierbarkeit (OHLF → Forschungsparkhaus → Gläserne Manufaktur) und zu den Grenzen markerbasierter Fahrzeugidentifikation sind direkt in zukünftige Produkt- und Forschungsentwicklungen überführbar. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden durch Sentics keine Schutzrechte angemeldet und keine eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen erstellt; die wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Konsortialpartner werden separat dargestellt.

II.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Nach Kenntnis der Sentics GmbH sind im Projektzeitraum keine Dritt-Ergebnisse bekannt geworden, die den im Projekt verfolgten ganzheitlichen Ansatz — die resiliente Verknüpfung diverser Akteure in Industrieumgebungen von der optischen Sensorik bis zur Fahrzeug- und Infrastruktursteuerung — vollumfänglich adressieren. Es existieren punktuelle Ansätze (verschlüsselte Kommunikationstunnel, Einzel-Sensorsysteme, einzelne Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikationslösungen), jedoch keine bekannte integrierte Betrachtung der Domäne einschließlich Resilienzbewertung und dynamischer Zertifizierung. Der Bedarf an solchen integrierten Ansätzen ist durch regulatorische Entwicklungen — EU AI Act, entstehende Normung zu KI in sicherheitskritischen Anwendungen — in den vergangenen Jahren weiter gestiegen.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden durch Sentics keine eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen erstellt. Die Darstellung des Projekts durch Sentics erfolgte über Industrieveranstaltungen, insbesondere die LogiMAT 2024 in Stuttgart. Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Konsortialpartner der TU Braunschweig werden im Gesamtverbund gesondert aufgeführt. Eine spätere Veröffentlichung in Form eines Best-Practice-Anwendungsbeispiels ist im Konsortium grundsätzlich vorgesehen.

Anhang und mitgeltende Dokumente

Die folgenden Dokumente sind Bestandteil bzw. unterstützende Unterlagen zum Schlussbericht: die interne Systemdokumentation zur Fahrzeuglokalisierung in Dresden (repro_de.pdf), die eine detaillierte Beschreibung der in AP5 durchgeführten Feldtestkampagne enthält; der Zwischenbericht vom 30.04.2024 (ZB_16KISR016_20240430.pdf) mit dem Stand 2023; der separat eingereichte aktualisierte Verwertungsplan als Fortschreibung nach Projektabschluss; sowie der interne Erfolgskontrollbericht (Teil III) zur Bewertung des Projekterfolgs.