

## **DATipilot Modul 1 Innovationssprints**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

**Kurzbericht und Eingehende Darstellung  
öffentlich**

**Sichere Infrastruktur durch Citizen-Science-unterstützte Fahrrad-Sen-  
sori**

**SICURA**

<b>Institution</b>	<b>Name Projektleitung</b>	<b>Förderkennzeichen</b>
Technische Hochschule Ulm	Prof. Dr. Hubert Mantz	03DPS1087

**LAUFZEIT:** 01.08.2024 – 31.07.2025

Ulm, den 27.01.2026

Autor: Prof. Dr. Hubert Mantz

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den  
Autoren.**

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzbericht .....</b>	<b>2</b>
1.1	Ausgangslage des Vorhabens.....	2
1.1.1.	<i>Ursprüngliche Aufgabenstellung.....</i>	<i>2</i>
1.1.2.	<i>Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele.....</i>	<i>2</i>
1.1.3.	<i>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....</i>	<i>2</i>
1.2	Ablauf des Vorhabens .....	3
1.3	Ergebnisse des Vorhabens .....	4
1.3.1.	<i>Wesentliche Ergebnisse.....</i>	<i>4</i>
1.3.2.	<i>Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....</i>	<i>6</i>
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung .....</b>	<b>7</b>
2.1	Durchgeführter Arbeitsplan.....	7
2.2	Erreichte Meilensteine.....	11
2.3	Erreichte Ergebnisse .....	12
2.3.1	<i>Erreichung der Gesamtziele .....</i>	<i>12</i>
2.3.2	<i>Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele .....</i>	<i>12</i>
2.4	Verwertung.....	13
2.4.1	<i>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses .....</i>	<i>13</i>
2.4.2	<i>Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens.....</i>	<i>14</i>
2.4.3	<i>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....</i>	<i>14</i>
2.4.4	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....</i>	<i>14</i>

# 1 Kurzbericht

Radfahrer sind auf sichere und gut gewartete Straßen angewiesen, doch Gefahren wie Schlaglöcher oder zu dichtes Überholen durch Kraftfahrzeuge bleiben oft unbemerkt, bis es zu Unfällen kommt. Um diesem Problem zu begegnen, wurde an der THU eine Multisensor-Fahrradplattform entwickelt, die mehrere Sensoren kombiniert: nach unten gerichtete RGB-D-Kameras und eine IMU zur Überwachung der Fahrbahnoberfläche sowie eine nach vorne gerichtete RGB-Kamera mit LiDAR zur Erfassung der Umgebung. Ein GNSS-Modul zeichnet die exakte Position jedes Ereignisses auf.

Der Aufbau wurde auf einer Strecke von rund 400 km zwischen Passau und Wien getestet – auf unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen wie Asphalt, Kopfsteinpflaster und Schotter sowie in verschiedenen Szenarien wie dem Überfahren von Entwässerungsrinnen, Überholvorgängen und Tunneldurchfahrten. Die Methode fusioniert stereoskopische Tiefeninformationen mit Vibrationsdaten zur Erkennung von Schlaglöchern und kombiniert Segmentierung, monokulare Tiefenschätzung und LiDAR, um Risiken wie den Überholabstand und die verfügbare Korridorbreite zu messen.

Die Kampagne trug damit dazu bei, das öffentliche Bewusstsein für Verkehrssicherheit und die Bedeutung des Umweltschutzes zu schärfen.

## 1.1 Ausgangslage des Vorhabens

### 1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

<b>Gesamtziel des Innovationssprints</b>	In SICURA sollen Fahrräder mit mobiler Sensorik ausgestattet werden, um den Straßenzustand ortsaufgelöst zu erfassen und zu klassifizieren. Schäden und Hindernisse sollen so identifiziert, lokalisiert und dokumentiert werden, um damit die Verkehrssicherheit zu erhöhen und eine effektive Straßenwartung zu ermöglichen.
--	--

### 1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

<b>Geplante konkrete Arbeitsziele</b>
Entwicklung und Validierung eines integrierten Sensorsystems, um den Straßenzustand georeferenziert erfassen zu können
Lokalisierung, Klassifikation und Dokumentation von Straßenschäden und Gefahrenstellen
Kartografierung von Straßenschäden und Gefahrenstellen
Aufbau eines funktionsfähigen Prototyps für Fahrräder zur Datenerhebung durch Radfahrer
Aufbau einer Nutzer-Community und Dateninfrastruktur zur flächendeckenden Datenaufnahme durch Fahrrad-Sensoren

### 1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Verbesserung der Verkehrssicherheit für Radfahrende ist eine zentrale Voraussetzung, um den zunehmenden Umstieg auf das Fahrrad aus Umwelt- und Gesundheitsgründen zu unterstützen. Ein wesentlicher Faktor hierfür ist die zuverlässige Überwachung des Straßenzustands. Zwar existieren moderne, fahrradmontierte Sensorsysteme (z. B. Laser-, Radar- oder Ultraschallsensoren), mit denen Hindernisse sowie Schäden wie Schlaglöcher oder Risse detektiert werden können, diese sind jedoch kostenintensiv und daher nicht für eine flächendeckende Erfassung geeignet. Smartphone-basierte Ansätze stellen zwar eine kostengünstige Alternative dar, liefern jedoch aufgrund begrenzter Sensorgenauigkeit keine ausreichend verlässliche Datenbasis.

Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt SICURA das Ziel, verschiedene moderne Sensortechnologien zu evaluieren, zu kombinieren und mit GPS-Daten zu synchronisieren, um präzise Positionsinformationen zu Straßenschäden, Unebenheiten und Hindernissen zu gewinnen.

Die Antragsteller bauen dabei auf Vorarbeiten aus dem Projekt „RadarMachtSafe“ (BMBF-Hochschulwettbewerb 2022) auf, in dem ein fahrradgestütztes Sensorsystem zur Messung von Abständen und Geschwindigkeiten überholender Fahrzeuge entwickelt und erprobt wurde. Die Montage und Inbetriebnahme der Sensorik erfolgte bei RadarMachtSafe im Rahmen von Mitmachformaten an der Hochschule, die Datenerhebung über Netzwerke des Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (ADFC). Begleitend fand eine breite Wissenschaftskommunikation auf öffentlichen Veranstaltungen statt.

## 1.2 Ablauf des Vorhabens

Das Projekt SICURA durchlief einen umfassenden Entwicklungszyklus, der von der theoretischen Forschung bis hin zur großskaligen Feldvalidierung reichte. Ziel des Projekts war es, dem mangelhaften Erhaltungszustand der Radverkehrsinfrastruktur zu begegnen, der in vielen Statistiken als wesentlicher Faktor bei tödlichen Fahrradunfällen benannt wird. Der Projektzeitplan wurde sorgfältig ausgelegt, um sicherzustellen, dass die Hardware einen Langstreckeneinsatz übersteht und zugleich verlässliche Daten zum Straßenzustand sowie zur umgebenden Verkehrsdynamik liefert.

Im ersten Quartal lag der Schwerpunkt auf der Evaluation bestehender Sensormethoden und der Beschaffung leistungsfähiger Hardware. Analysiert wurden unter anderem die Grenzen von Stereovision, CNN-basierter RGB-Analyse und vibrationsbasierter Verfahren. Dabei zeigte sich, dass Einzelsensorsysteme insbesondere bei schlechten Lichtverhältnissen versagen oder auf strukturierten Oberflächen zu Fehlklassifikationen neigen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden die Komponenten für eine Multisensor-Fusionsplattform beschafft, darunter zwei Tiefenkameras vom Typ Intel RealSense D455, ein Slamtec A3 LiDAR zur Umgebungserfassung sowie ein GNSS-Modul vom Typ u-blox ZED-F9R zur zentimetergenauen Positionsbestimmung.

In der zweiten Phase verlagerte sich der Fokus auf die Entwicklung von Synchronisationsalgorithmen und die softwareseitige Integration. Da die ausschließliche Nutzung einzelner Sensoren als ungenau bewertet wurde, konzentrierte sich die Forschung auf die Fusion stereoskopischer Tiefendaten mit mechanischen Vibrationsinformationen. Ein Onboard-Rechner wurde so programmiert, dass die Datenerfassung koordiniert erfolgt und jedes Tiefenbild, jedes IMU-Vibrationsprofil, jeder LiDAR-Scan sowie jede GNSS-Position präzise zeitgestempelt und zueinander ausgerichtet sind. Diese Integration ermöglichte eine hohe Aufnahme rate von 25 Bildern pro Sekunde, die für eine konsistente Datenerfassung auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten erforderlich ist.

Die dritte Phase umfasste die mechanische Konstruktion sowie die Umsetzung eines autarken Energiesystems. Entwickelt wurde ein starrer Auslegerarm, der in einem Abstand von einem Meter vor dem Fahrradrahmen und in einer Höhe von 0,8 Metern positioniert ist, um ein freies Sichtfeld zu gewährleisten und rahmeninduzierte Störeinflüsse zu reduzieren. Parallel dazu wurde ein netzunabhängiges Energieversorgungssystem auf Basis eines photovoltaischen Dachmoduls realisiert. Dieses solarbetriebene System lädt eine Batterie in einer geschützten Transportbox und stellt so den kontinuierlichen Betrieb der Elektronik während der Tagesstunden sicher, wodurch externe Ladevorgänge bei langen Fahrten weitgehend entfallen.

Das letzte Projektquartal war der Realvalidierung in Form einer anspruchsvollen 400-km-Feldkampagne von Passau nach Wien gewidmet. Die Strecke wurde gezielt aufgrund ihrer großen Bandbreite an Fahrbahnoberflächen ausgewählt, darunter Asphalt, Kopfsteinpflaster, Schotter und Brücken. Das System wurde in unterschiedlichen Szenarien wie Tunneldurchfahrten und Überholvorgängen getestet und konnte dabei sowohl Oberflächenunebenheiten wie Entwässerungslinien zuverlässig erkennen als auch umgebungsbezogene Risiken quantifizieren. Die Kampagne wurde erfolgreich abgeschlossen, erreichte den Technology Readiness Level (TRL) 7 und liefert Stadt- und Verkehrsplanern eine zusätzliche datenbasierte Grundlage zur Verbesserung der Sicherheit im Radverkehr.



Abbildung 1: Impression aus der Messfahrt von Passau nach Wien

## 1.3 Ergebnisse des Vorhabens

### 1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Messkampagne auf der rund 400 km langen Strecke von Passau nach Wien bestätigte die Leistungsfähigkeit der entwickelten Sensorplattform zur Erfassung und Auswertung vielfältiger Verkehrssituationen. Die gewonnenen Ergebnisse wurden in die Bereiche Analyse des Straßenzustands und Analyse der Umgebungsbedingungen unterteilt und in einer 2×2-Visualisierung zusammengeführt, um mehrere Datenströme integriert darzustellen. Die Oberflächenanalyse kombinierte RGB-Bilddaten mit normierten Tiefenkarten (0,5 m bis 0,7 m) sowie IMU-basierten Vibrationsindikatoren, die bei hohen Schwingungsereignissen von grün zu rot wechselten. Ergänzend dazu wurden für die Umgebungsanalyse eine nach vorne gerichtete RGB-Ansicht, LiDAR-Polardarstellungen für metrische Distanzen bis 10 m sowie CNN-basierte Ergebnisse zur semantischen Segmentierung und monokularen Tiefenschätzung genutzt.

Durch die Fusion visueller Tiefeninformationen mit mechanischen Vibrationsdaten zeigte die Plattform eine hohe Zuverlässigkeit bei der Detektion unterschiedlicher Fahrbahnebenenheiten. Strukturelle Merkmale wie Entwässerungsöffnungen konnten geometrisch klar abgebildet werden, ebenso wie ungleichmäßige Höhenverläufe der Fahrbahn, einschließlich kleiner, wassergefüllter Gefahrenstellen, die mit Einzelsensoren häufig nicht erkannt werden. Diese visuellen Detektionen wurden durch zeitlich synchronisierte IMU-Signale konsistent bestätigt, die charakteristische Beschleunigungsspitzen zum Zeitpunkt des Überrollens aufzeichneten. Der Multisensoransatz erwies sich zudem als wesentlich, um punktuelle Schäden von längeren Rauigkeitsabschnitten zu unterscheiden, da visuelle Auffälligkeiten mit der Intensität der gemessenen Vibrationen korreliert werden konnten. Durch die Anpassung der Tiefenskalierung und die gemeinsame Bewertung von Texturinformationen und moderaten Vibrationsniveaus konnten Fehlklassifikationen, etwa bei grobem oder unebenem Belag, vermieden werden, was eine hohe Detektionsgenauigkeit über verschiedene Fahrbahntypen hinweg sicherstellte.

Auch im Bereich der Umgebungsüberwachung konnte die Plattform komplexe Wechselwirkungen zwischen Radfahrenden, Verkehrsteilnehmenden und Infrastruktur zuverlässig quantifizieren. Die Kombination aus LiDAR-Messungen und CNN-basierter Segmentierung ermöglichte eine präzise Klassifikation anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Bestimmung aktueller Abstände in gemeinsam genutzten Verkehrsflächen. Ein

zentrales Ergebnis war die objektive Erfassung kritischer Überholvorgänge, bei denen seitliche Abstände beim Überholen durch motorisierte Fahrzeuge metrisch dokumentiert wurden. Darüber hinaus wurden bauliche Restriktionen wie die exakte Breite von Durchfahrten und graduelle Änderungen der Korridor geometrie, beispielsweise in Tunneln, präzise vermessen. Durch die klare Unterscheidung zwischen Wänden, Fahrbahnoberflächen und weiteren strukturellen Elementen liefert das System eine umfassende Datengrundlage zur Quantifizierung realer Risiken und räumlicher Einschränkungen im Radverkehr und bietet damit wertvolle Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung kommunaler Verkehrssicherheitskonzepte.

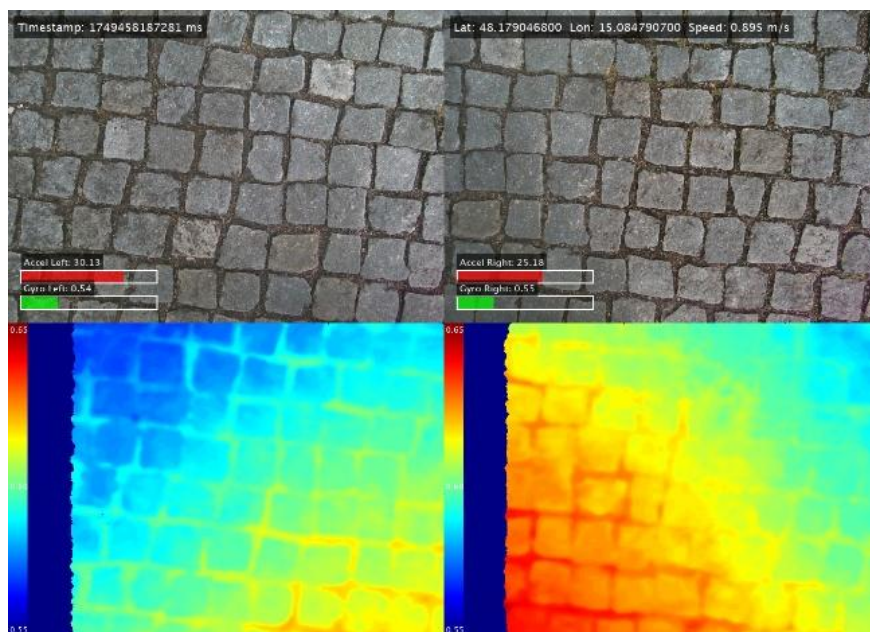


Abbildung 2: Sensorfusion: Optische Signale kombiniert mit Tiefeninformation zur Rauigkeitsbestimmung von Straßenoberflächen

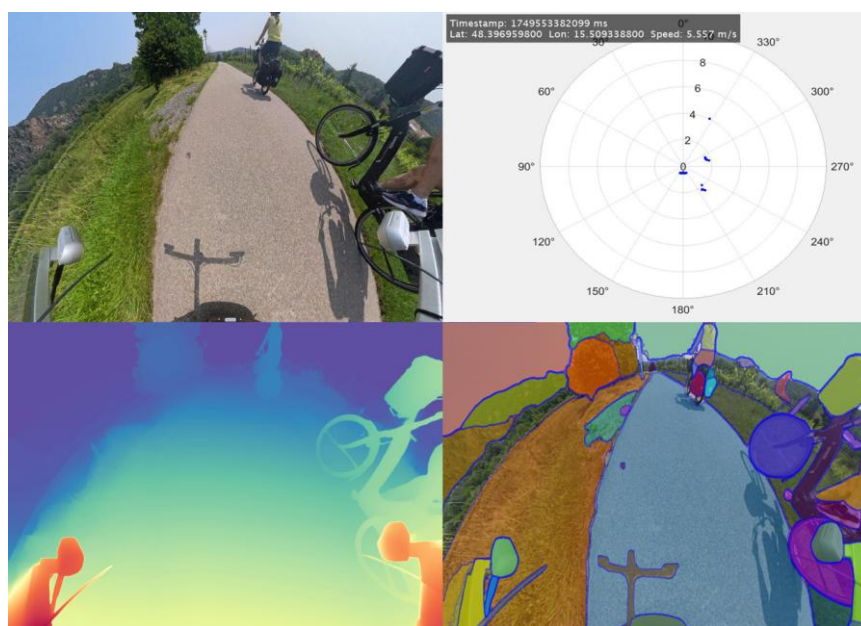


Abbildung 3: Umgebungsüberwachung durch Kombination von 360°-Kameras mit LiDAR-Messungen und CNN-basierter Segmentierung

### **1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Sensorik wurde von Wissenschaftler:innen der Technischen Hochschule Ulm konzipiert und umgesetzt. An der Messkampagnentour waren darüber hinaus der Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (ADFC) Ulm/Neu-Ulm/Alb-Donau-Kreis, das Zentrum für Allgemeine Wissenschaftliche Weiterbildung (ZAWiW) sowie der Botanische Garten der Universität Ulm beteiligt. Unter dem Motto „Ulm forscht gemeinsam unterwegs“ verband die einwöchige Forschungsradtour entlang des Donau-Radwegs von Passau nach Wien technische Erfassung, naturkundliche Beobachtungen und bürgerschaftliches Engagement zu einem integrativen Citizen-Science-Format. Neben der systematischen Dokumentation der Wegbeschaffenheit mit der SICURA-Sensorplattform wurde entlang der Strecke auch die biologische Vielfalt mit der App iNaturalist erfasst und ausgewertet, was die Vernetzung technischer Infrastrukturforschung mit offenen bürgerwissenschaftlichen Aktivitäten förderte. Die Beteiligung dieser Partnerinstitutionen trug wesentlich dazu bei, Forschung, Öffentlichkeitsarbeit und gesellschaftlichen Austausch entlang der Route zu verknüpfen und die Sichtbarkeit des Projekts in der Region zu erhöhen.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

	abgeschlossen		
	nicht abgeschlossen		nicht durchgeführt
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>AP 1 Entwicklung einer Sensorplattform</b>			
1.1 Spezifikation und Konzeption einer geeigneten Sensorik	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2 Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prototypen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.3 Erprobung und Validierung des Prototyps auf der Straße	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>AP 2 Aufbau weiterer Ausführungen der Sensorplattform (Citizen Science)</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>AP 3 Datenerhebung und Kartierung</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

#### Arbeitspaket 1.1 Spezifikation und Konzeption einer geeigneten Sensorik

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Spezifikation und Konzeption einer geeigneten Sensorik zur Erfassung sicherheitsrelevanter Zustände der Radverkehrsinfrastruktur erarbeitet. Ziel war die Entwicklung eines robusten, mobilen und energieautarken Sensorsystems, das unter realen Einsatzbedingungen sowohl den Fahrbahnzustand als auch umgebungsbezogene Gefährdungen zuverlässig erfassen kann.

Zu Beginn des Arbeitspakets erfolgte eine systematische Analyse bestehender Ansätze zur Fahrbahnbewertung und Umfeldüberwachung, darunter optische Verfahren (RGB- und Stereokameras), vibrationsbasierte Messungen mittels inertialer Sensoren sowie smartphonebasierte Erfassungsmethoden. Erste konzeptionelle Untersuchungen zeigten, dass rein vibrationsbasierte Ansätze insbesondere auf strukturierten Belägen wie Kopfsteinpflaster oder Schotter zu einer hohen Anzahl an Fehlklassifikationen führen. Parallel dazu erwiesen sich ausschließlich kamerabasierte Verfahren als unzureichend robust gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen, geringen Texturunterschieden auf Asphalt sowie Verschattungseffekten. Diese Erkenntnisse führten zur Aufgabe von Einzelsensoransätzen und machten eine alternative, kombinierte Herangehensweise erforderlich.

Auf dieser Grundlage wurde ein Multisensoransatz spezifiziert, bei dem optische Tiefeninformationen mit inertialen Messdaten fusioniert werden. Ergänzend wurde eine distanzmessende Sensorik zur Erfassung des umgebenden Verkehrs und infrastruktureller Engstellen vorgesehen. Die Spezifikation umfasste dabei nicht nur die Auswahl geeigneter Sensortypen, sondern auch Anforderungen an Synchronisation, Abtastrate, mechanische Entkopplung und Energieversorgung. Insbesondere die Notwendigkeit eines vollständig autarken Betriebs führte zu einer Anpassung der ursprünglichen Planung hin zu einem energieeffizienten Gesamtsystem mit solarunterstützter Stromversorgung.

Während der Konzeptionsphase wurden mehrere alternative Sensoranordnungen und Montagepositionen betrachtet und teilweise praktisch erprobt. Frühere Varianten mit rahmennaher Montage mussten verworfen werden, da sich hier eine zu starke Übertragung von Fahrwerksvibrationen auf die Sensorik zeigte. Dies führte zur Entwicklung eines separaten, starr ausgeführten Auslegers zur räumlichen Entkopplung der Sensoren vom Fahrradrahmen. Das Arbeitspaket konnte inhaltlich vollständig durchgeführt werden; das geplante Ergebnis – eine belastbare und umsetzbare Sensorspezifikation – wurde erreicht und bildete die Grundlage für die anschließende technische Implementierung.

Für die Durchführung des Arbeitspakets waren vor allem personelle Ressourcen im Bereich Sensorik, Signalverarbeitung und Systemintegration erforderlich. Die Arbeiten wurden überwiegend durch wissenschaftliches Personal der Technischen Hochschule Ulm umgesetzt. Externe Expertise wurde punktuell bei der Bewertung geeigneter GNSS-Komponenten herangezogen. Aufgrund der iterativen, überwiegend digitalen Abstimmung innerhalb des Projektteams sowie mit externen Partnern konnten Reisekosten weitgehend vermieden werden. Der personelle Aufwand entsprach im Wesentlichen der ursprünglichen Planung; durch die frühe Identifikation nicht zielführender Einzelsensoransätze konnten zeitintensive Umwege in späteren Projektphasen vermieden werden, was sich positiv auf den weiteren Projektverlauf auswirkte.

### **Arbeitspaket 1.2 Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prototypen**

Aufbauend auf der in Arbeitspaket 1.1 erarbeiteten Sensorspezifikation wurde in diesem Arbeitspaket ein funktionsfähiger Prototyp der Multisensor-Fahrradplattform entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Ziel war die Umsetzung der konzeptionellen Anforderungen in ein robustes Gesamtsystem, das unter realen Einsatzbedingungen zuverlässig betrieben werden kann.

Die Entwicklungsarbeiten umfassten zunächst die Integration der ausgewählten Sensorik in eine gemeinsame Hardware- und Softwarearchitektur. Hierzu wurden optische Tiefensensoren, inertielle Messeinheiten, distanzmessende Sensorik sowie GNSS-Komponenten mechanisch montiert und elektrisch angebunden. Parallel dazu wurde eine geeignete Onboard-Recheneinheit ausgewählt und für die synchrone Datenerfassung und -speicherung konfiguriert. Ein besonderer Fokus lag auf der zeitlichen Synchronisation aller Sensordaten, da sich früh zeigte, dass bereits geringe Zeitversätze die spätere Datenfusion erheblich beeinträchtigen können. Erste Implementierungen mit unsynchronisierten Treibern mussten daher verworfen und durch eine zentral gesteuerte Zeitstempelung ersetzt werden.

Der mechanische Aufbau des Prototyps erfolgte iterativ. Frühere Montagestrategien, bei denen die Sensorik direkt am Fahrradrahmen befestigt wurde, führten zu unerwünschten Schwingungseinträgen und unzureichender Stabilität der Messdaten. Als notwendige Alternative wurde ein starrer Auslegerarm entwickelt, der die Sensoren in definiertem Abstand und Höhe vor dem Fahrrad positioniert. Diese Konstruktion verbesserte sowohl die Sichtfelder der Sensoren als auch die Reproduzierbarkeit der Messungen, erforderte jedoch zusätzliche Anpassungen an Gewicht, Balance und Befestigungstechnik.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Arbeitspakets war die Entwicklung und Integration eines autarken Energieversorgungssystems. Ursprünglich war ein rein akkubasierter Betrieb vorgesehen, der sich in ersten Tests jedoch als unzureichend für längere Einsatzstrecken erwies. Infolgedessen wurde das System um eine photovoltaisch unterstützte Energieversorgung erweitert, die den kontinuierlichen Betrieb der Sensorik und Recheneinheit während längerer Fahrten ermöglicht. Die Integration des Energiesystems erforderte zusätzliche Schutzmaßnahmen gegen Witterungseinflüsse sowie Anpassungen an der elektrischen Absicherung und Verkabelung.

Die Inbetriebnahme des Prototyps erfolgte schrittweise über Labor-, Kurzstrecken- und Vorfeldtests. In dieser Phase traten mehrere softwareseitige Probleme auf, insbesondere im Bereich der Datenlogging-Stabilität bei hohen Abtastraten. Einzelne Fahrten mussten wiederholt werden, da Datenpakete unvollständig gespeichert oder GNSS-Signale zeitweise verloren gingen. Diese Probleme konnten durch Optimierung der Datenpipeline, Reduktion unnötiger Schreibzugriffe und eine verbesserte Fehlerbehandlung behoben werden. Nach Abschluss dieser Anpassungen stand ein stabiler Prototyp zur Verfügung, der für den anschließenden Feldeinsatz geeignet war.

Das Arbeitspaket konnte insgesamt vollständig durchgeführt werden. Das geplante Ergebnis – ein einsatzfähiger, robuster Prototyp der Multisensor-Fahrradplattform – wurde erreicht und bildete die Grundlage für die umfangreiche Feldvalidierung in den folgenden Arbeitspaketen. Die im Entwicklungsprozess identifizierten technischen Herausforderungen führten zwar zu iterativen Anpassungen, hatten jedoch keine negativen Auswirkungen auf den weiteren Projektverlauf, sondern verbesserten die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

### **Arbeitspaket 1.3 Erprobung und Validierung des Prototyps auf der Straße**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erprobung und Validierung des entwickelten Prototyps unter realen Einsatzbedingungen im öffentlichen Straßenraum. Während die vorangegangenen Arbeitspakete primär auf Konzeption und Aufbau fokussiert waren, sollte in diesem Schritt überprüft werden, ob die Sensorplattform im Dauerbetrieb zuverlässig funktioniert, verwertbare Daten liefert und den geplanten Anwendungsfall unter realistischen Bedingungen abdeckt.

Die Erprobung erfolgte in mehreren Stufen. Zunächst wurden kurze Testfahrten im urbanen Umfeld durchgeführt, um grundlegende Funktionen wie Datenaufzeichnung, Synchronisation der Sensoren, Energieversorgung und mechanische Stabilität zu überprüfen. Dabei traten vereinzelt Probleme auf, insbesondere in Form von temporären Datenlücken bei GNSS-Signalen in dichter Bebauung sowie unerwarteten Abschaltungen einzelner Sensoren bei hoher thermischer Belastung. Diese Erkenntnisse führten zu zusätzlichen Schutzmaßnahmen, Anpassungen an der Stromversorgung sowie einer Optimierung der Software zur Fehlererkennung und Wiederinitialisierung der Sensorik.

Aufbauend auf diesen Vorversuchen wurde der Prototyp im Rahmen einer mehrtägigen Messkampagne auf einer rund 400 km langen Strecke zwischen Passau und Wien eingesetzt. Diese Strecke wurde bewusst gewählt, da sie eine große Bandbreite an realen Einsatzbedingungen abbildet, darunter unterschiedliche Fahrbahnoberflächen (Asphalt, Kopfsteinpflaster, Schotter), infrastrukturelle Besonderheiten (Brücken, Entwässerungsrinnen, Tunnel) sowie variierende Verkehrssituationen mit Mischverkehr und Überholvorgängen durch Kraftfahrzeuge. Die Messfahrten dienten sowohl der technischen Validierung der Sensorik als auch der inhaltlichen Bewertung der gewonnenen Daten.

Während der Feldkampagne zeigte sich, dass der Prototyp grundsätzlich robust und einsatzfähig ist. Die Sensorik arbeitete über lange Strecken hinweg stabil, und die autarke Energieversorgung ermöglichte einen durchgehenden Betrieb während der Tagesfahrten. Dennoch traten auch hier vereinzelt Einschränkungen auf: Bei stark wechselnden Lichtverhältnissen, etwa an Tunnellein- und -ausfahrten, waren Anpassungen der Belichtungsparameter erforderlich, und bei sehr rauen Untergründen kam es temporär zu erhöhtem mechanischem Stress auf die Montage. Diese Effekte führten nicht zum Abbruch der Messungen, flossen jedoch als wichtige Erkenntnisse in die Bewertung der Systemgrenzen ein.

Die Validierung der Messdaten erfolgte durch den Abgleich verschiedener Sensordatenströme. Fahrbahnunebenheiten konnten konsistent durch die Kombination aus optischer Tiefenerfassung und IMU-basierten Vibrationsdaten identifiziert werden. Ebenso ließ sich das Umfeldgeschehen, insbesondere Überholvorgänge und infrastrukturelle Engstellen, mithilfe der distanzmessenden Sensorik nachvollziehbar quantifizieren. Die im Arbeitspaket geplanten Validierungsziele wurden damit erreicht; der Prototyp konnte seine grundsätzliche Funktionsfähigkeit und Eignung für den vorgesehenen Anwendungsfall nachweisen.

Für die Durchführung des Arbeitspakets waren neben personellen Ressourcen insbesondere logistische und organisatorische Aufwände erforderlich. Die Erprobung erfolgte im öffentlichen Raum und erforderte daher eine sorgfältige Routenplanung sowie die Abstimmung innerhalb des Projektteams. Externe Expertise war nicht erforderlich; jedoch wurde durch die Einbindung von Kooperationspartnern eine praxisnahe Bewertung der Einsatzbedingungen ermöglicht. Reisekosten entstanden im Rahmen der Feldkampagne, konnten jedoch durch die Bündelung der Tests in einer zusammenhängenden Strecke effizient begrenzt werden. Der personelle Aufwand lag leicht über der ursprünglichen Planung, da zusätzliche Vor- und Nachtests notwendig wurden, hatte jedoch keine negativen Auswirkungen auf den Gesamtprojektverlauf.

Das Arbeitspaket wurde vollständig durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse bestätigten die grundsätzliche Eignung des Prototyps und lieferten zugleich wertvolle Hinweise für mögliche Weiterentwicklungen in zukünftigen Projektphasen, insbesondere im Hinblick auf Robustheit, Miniaturisierung und langfristigen Einsatz im Regelbetrieb.

## **AP 2 Aufbau weiterer Ausführungen der Sensorplattform (Citizen Science)**

Das Arbeitspaket 2 sah ursprünglich den Aufbau weiterer Ausführungen der Sensorplattform sowie deren Einsatz im Rahmen eines Citizen-Science-Ansatzes vor. Dieses Arbeitspaket wurde im Projektverlauf nicht umgesetzt.

Grund hierfür waren die im Rahmen der Arbeitspakete 1.1 bis 1.3 gewonnenen Erkenntnisse zur technischen Komplexität und zum Integrationsaufwand der Sensorplattform. Bereits während der Entwicklung, des Aufbaus und insbesondere der umfangreichen Straßenerprobung des Prototyps zeigte sich, dass der Betrieb der Plattform eine hohe Systemstabilität, präzise Kalibrierung sowie ein vertieftes technisches Verständnis der Sensorfusion und Datenintegrität erfordert. Diese Voraussetzungen wären im vorgesehenen Projektzeitraum und mit den verfügbaren Ressourcen für eine sichere und valide Nutzung durch externe Citizen-Science-Teilnehmende nicht in ausreichendem Maße gewährleistet gewesen.

Darüber hinaus führte der notwendige iterative Entwicklungs- und Optimierungsaufwand am Prototyp dazu, dass sich der zeitliche Schwerpunkt des Projekts stärker auf die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit, Robustheit und Datenqualität einer einzelnen Plattform verlagerte. Eine parallele Vervielfältigung der Hardware hätte entweder eine erhebliche Reduktion der Entwicklungs- und Validierungstiefe oder einen nicht geplanten Mehraufwand an personellen und finanziellen Ressourcen erfordert. Vor diesem Hintergrund wurde bewusst entschieden, den Aufbau weiterer Plattformen zugunsten einer belastbaren Validierung eines einzelnen Systems zurückzustellen.

Das ursprünglich mit AP 2 verfolgte Ziel einer breiten Beteiligung und gesellschaftlichen Einbindung wurde stattdessen teilweise durch alternative Maßnahmen adressiert. Insbesondere die öffentlich sichtbare Feldkampagne sowie die Einbindung externer Partnerinstitutionen trugen dazu bei, das Projekt dennoch im Sinne eines zivilgesellschaftlich verankerten Forschungsvorhabens umzusetzen, ohne dabei die technische Qualität der erhobenen Daten zu gefährden.

Die Anpassung in AP 2 hatte keine negativen Auswirkungen auf die Zielerreichung der Kernvorhaben des Projekts. Im Gegenteil konnte durch die Fokussierung auf Entwicklung, Erprobung und Validierung eines stabilen Prototyps ein höheres Technology Readiness Level erreicht werden als ursprünglich vorgesehen. Die Umsetzung eines Citizen-Science-Ansatzes mit mehreren Plattformen wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse als sinnvoller Gegenstand einer möglichen Folgeförderung bewertet, in der Aspekte wie Miniaturisierung, Vereinfachung der Bedienung und Skalierbarkeit gezielt adressiert werden können.

## **AP 3 Datenerhebung und Kartierung**

Ziel des Arbeitspakets 3 war gemäß Antrag die systematische Datenerhebung mittels sensorbestückter Fahrräder sowie die kartografische Aufbereitung der gewonnenen Daten, um sicherheitsrelevante Zustände der Radverkehrsinfrastruktur räumlich darzustellen und für planerische Entscheidungen nutzbar zu machen.

Die Datenerhebung wurde im Projektverlauf schwerpunktmäßig mit dem im Arbeitspaket 1 entwickelten und validierten Prototypen durchgeführt. Zentrale Grundlage bildete eine mehrtägige Messkampagne auf einer rund 400 km langen Strecke zwischen Passau und Wien. Diese Strecke deckte – entsprechend der im Antrag vorgesehenen Zielsetzung – eine große Bandbreite an Einsatzbedingungen ab, darunter unterschiedliche Fahrbahnoberflächen (Asphalt, Kopfsteinpflaster, Schotter), infrastrukturelle Elemente (Brücken, Entwässerungsrinnen, Tunnel) sowie variierende Verkehrssituationen im Mischverkehr. Ergänzend wurden einzelne Kurzstreckenfahrten durchgeführt, um spezifische Szenarien gezielt zu erfassen und zu überprüfen.

Alle während der Fahrten erhobenen Sensordaten (Fahrbahnzustand, Umfeldinformationen, IMU-Daten) wurden zeitlich synchronisiert und mit GNSS-Positionsinformationen versehen, sodass eine eindeutige räumliche Zuordnung der Messereignisse möglich war. Damit konnte grundsätzlich nachgewiesen werden, dass die entwickelte Sensorplattform geeignet ist, sicherheitsrelevante Ereignisse georeferenziert zu erfassen.

Abweichend von der ursprünglichen Planung erfolgte die Datenerhebung nicht durch eine Vielzahl von Citizen-Science-Teilnehmenden, sondern konzentriert auf das Projektteam und ausgewählte Kooperationspartner. Hintergrund hierfür war die im Projektverlauf getroffene Entscheidung, das Arbeitspaket 2 (Aufbau weiterer Ausführungen der Sensorplattform) nicht umzusetzen. Infolgedessen konnte die im Antrag vorgesehene flächendeckende Datensammlung durch mehrere parallele Plattformen nicht realisiert werden. Die Datenerhebung im Rahmen von AP 3 wurde daher in Umfang und Skalierung angepasst.

Auch im Bereich der Kartierung ergaben sich inhaltliche Anpassungen gegenüber der ursprünglichen Planung. Erste Versuche einer umfassenden, automatisierten Kartierung aller detektierten Ereignisse zeigten, dass ohne zusätzliche Entwicklungsarbeiten im Bereich Datenmodellierung, Qualitätskontrolle und Nutzerführung eine hinreichende Datenvalidität nicht sichergestellt werden kann. Statt einer vollumfänglichen, öffentlich zugänglichen Kartenplattform wurde daher ein fokussierter Ansatz verfolgt, bei dem ausgewählte, repräsentative Ereignisse exemplarisch kartografisch aufbereitet und analysiert wurden. Ziel war hierbei der methodische Nachweis der grundsätzlichen Kartierbarkeit und nicht die Bereitstellung eines produktiven Kartendienstes.

Das Arbeitspaket konnte damit in angepasster Form durchgeführt werden. Die geplanten Ergebnisse wurden teilweise erreicht: Die technische Machbarkeit der georeferenzierten Datenerhebung und kartografischen Zuordnung wurde erfolgreich demonstriert, während der ursprünglich vorgesehene Umfang der Datenerhebung und -verbreiterung durch Citizen Science nicht realisiert werden konnte. Diese Einschränkung hatte keine negativen Auswirkungen auf die Zielerreichung der Kernfragestellungen des Projekts, verdeutlichte jedoch den zusätzlichen Entwicklungsbedarf für eine skalierbare Umsetzung.

Für die Durchführung des Arbeitspakets waren vor allem personelle Ressourcen im Bereich Datenanalyse, Signalverarbeitung und Geodatenverarbeitung erforderlich. Die Arbeiten wurden überwiegend durch das Projektteam umgesetzt. Die im Antrag vorgesehenen Reisen zur Koordination mit externen Partnern konnten größtenteils mit der zentralen Feldkampagne kombiniert werden, sodass der Reiseaufwand geringer ausfiel als ursprünglich geplant. Der personelle Aufwand verlagerte sich stärker auf Datenaufbereitung und manuelle Validierung, was bei gleichzeitiger Reduktion des Umfangs der Datenerhebung insgesamt im Rahmen der verfügbaren Ressourcen blieb.

Die im Arbeitspaket gewonnenen Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für mögliche Folgeprojekte, in denen insbesondere die Skalierung der Datenerhebung, die Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie der Aufbau automatisierter Kartierungs- und Visualisierungslösungen gezielt weiterentwickelt werden können.

## 2.2 Erreichte Meilensteine

### Meilensteine

Beschreibung: messbare Zielparame-ter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Geeignetes Sensorsystem ausgewählt und Messprinzip evaluiert	1	2	2	planmäßig erreicht
funktionsfähiger Prototyp aufgebaut und Funktionsweise evaluiert	2	7	6	planmäßig erreicht

## 2.3 Erreichte Ergebnisse

### 2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

<b>Gesamtziel des Innovationssprints</b>	In SICURA sollen Fahrräder mit mobiler Sensorik ausgestattet werden, um den Straßenzustand orts aufgelöst zu erfassen und zu klassifizieren. Schäden und Hindernisse sollen so identifiziert, lokalisiert und dokumentiert werden, um damit die Verkehrssicherheit zu erhöhen und eine effektive Straßenwartung zu ermöglichen.	Die Projektziele wurden vollumfänglich erreicht.
--	---	--

### 2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

<b>Geplante konkrete Arbeitsziele</b>	<b>Erfüllung</b>
Entwicklung und Validierung eines integrierten Sensorsystems, um den Straßenzustand georeferenziert erfassen zu können	<b>Erreicht.</b> Ein integriertes Multisensorsystem wurde entwickelt, aufgebaut und im Rahmen einer umfangreichen Feldkampagne erfolgreich unter realen Einsatzbedingungen validiert.
Lokalisierung, Klassifikation und Dokumentation von Straßenschäden und Gefahrenstellen	<b>Erreicht.</b> Straßenschäden und Gefahrenstellen konnten durch die Kombination aus optischer Tiefenerfassung, inertialen Messdaten und GNSS-Informationen zuverlässig lokalisiert, klassifiziert und dokumentiert werden.
Kartografierung von Straßenschäden und Gefahrenstellen	<b>Erreicht.</b> Die grundsätzliche kartografische Zuordnung und Darstellung sicherheitsrelevanter Ereignisse wurde erfolgreich demonstriert, eine flächendeckende und automatisierte Kartierung wurde jedoch im Projektverlauf nicht komplett vollständig umgesetzt.
Aufbau eines funktionsfähigen Prototyps für Fahrräder zur Datenerhebung durch Radfahrer	<b>Erreicht.</b> Ein funktionsfähiger, robuster Prototyp wurde aufgebaut, in Betrieb genommen und im öffentlichen Straßenraum erfolgreich eingesetzt.
Aufbau einer Nutzer-Community und Dateninfrastruktur zur flächendeckenden Datenaufnahme durch Fahrrad-Sensoren	<b>Nicht erreicht.</b> Der Aufbau einer breiten Nutzer-Community und einer skalierbaren Dateninfrastruktur wurde aufgrund der bewussten Fokussierung auf Entwicklung und Validierung eines einzelnen Prototyps im vorgesehenen Projektzeitraum nicht umgesetzt.

**Zusätzliche oder neue Arbeitsergebnisse, die im Projektverlauf entstanden sind:**

Entwicklung eines robusten Multisensor-Fusionsansatzes zur zuverlässigen Unterscheidung zwischen tatsächlichen Straßenschäden und strukturierten Oberflächen (z. B. Kopfsteinpflaster).
Erfolgreiche Umsetzung und Erprobung eines energieautarken, solarunterstützten Betriebskonzepts für den Langstreckeneinsatz.
Entwicklung eines integrierten Visualisierungskonzepts zur gemeinsamen Darstellung synchronisierter Sensor- und Positionsdaten.
Gewinn zusätzlicher Erkenntnisse zu Systemgrenzen, Umwelteinflüssen und praktischen Anforderungen mobiler Sensorsysteme im Radverkehr als Grundlage für Folgeprojekte.

**2.4 Verwertung****2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Im Rahmen der Förderrichtlinie „DATIpilot, Modul 1: Innovationssprints“ wurde das Projekt SICURA bis zum Technology Readiness Level (TRL) 7 durchgeführt. Damit konnte ein funktionsfähiger und im realen Einsatz validierter Prototyp einer mobilen Multisensorplattform zur Erfassung sicherheitsrelevanter Zustände der Radverkehrsinfrastruktur entwickelt werden. Weiterführende Entwicklungen in Richtung Serienreife, Skalierung und breiter Anwendung sind folgerichtig Gegenstand nachgelagerter Aktivitäten.

Die im Antrag dargestellte Verwertungsstrategie (Kapitel 4 der Vorhabenbeschreibung) bleibt in ihren Grundzügen gültig, wurde jedoch auf Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse in einzelnen Punkten konkretisiert und angepasst.

**Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Wie im Antrag vorgesehen, wurde keine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung im Projektverlauf angestrebt. Diese Einschätzung bestätigt sich auch nach Projektabschluss. Die Ergebnisse stellen jedoch eine belastbare Grundlage für nachgelagerte wirtschaftliche Aktivitäten dar, insbesondere im Rahmen von Ausgründungen oder kooperativen Entwicklungsprojekten (z. B. Dienstleistungen zur infrastrukturellen Datenerhebung, Analyse oder Entwicklung spezialisierter Sensorsysteme).

Änderung gegenüber dem Antrag: Der Fokus hat sich von einer schnellen Skalierung hin zu einer technologischen Konsolidierung und Robustheitssteigerung als notwendige Voraussetzung für wirtschaftliche Verwertung verschoben.

**Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten**

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten entsprechen weitgehend der ursprünglichen Planung und wurden teilweise übertroffen. Das Projekt lieferte vertiefte Erkenntnisse zur Kombination optischer, inertialer und distanzmessender Sensorik unter realen Einsatzbedingungen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für wissenschaftliche Publikationen, Präsentationen sowie weiterführende Forschungsprojekte in den Bereichen Radverkehrssicherheit, urbane Mobilität, Sensorfusion und mobile Datenerfassung.

Ergänzung gegenüber dem Antrag: Die systematische Feldvalidierung über eine Langstreckenmesskampagne liefert zusätzliche empirische Erkenntnisse, die im Antrag in dieser Tiefe noch nicht absehbar waren.

Änderung gegenüber dem Antrag: Anstelle einer breiten Citizen-Science-Skalierung im Projekt selbst wurde der Fokus auf die Entwicklung eines stabilen Referenzsystems gelegt, das künftig als Grundlage für vereinfachte, nutzerne Transferformate dienen kann.

**Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die im Antrag beschriebene Anschlussfähigkeit wurde bestätigt. Die Projektergebnisse eignen sich als Ausgangspunkt für interdisziplinäre und internationale Kooperationen in den Bereichen Urban Mobility,

Smart Cities, Sensorik, Datenanalyse und Bürgerwissenschaft. Darüber hinaus eröffnen sich neue Anwendungsfelder jenseits des Radverkehrs, etwa bei der Zustandsüberwachung von Fußwegen, Brücken, Schieneninfrastruktur oder anderen Verkehrsanlagen.

### **Gesellschaftlicher Nutzen und Transfer**

Der im Antrag vorgesehene gesellschaftliche Nutzen bleibt zentraler Bestandteil der Verwertungsstrategie. Die Projektergebnisse zeigen modellhaft, wie mobile Sensorik zur objektiven Bewertung von Radverkehrsinfrastruktur eingesetzt werden kann. Kommunen, Stadtplanungsämter und Verkehrsbehörden können von den Ergebnissen profitieren, indem georeferenzierte Messdaten als Entscheidungsgrundlage für Wartung, Priorisierung und infrastrukturelle Verbesserungen genutzt werden.

Die entwickelte Plattform stellt damit eine übertragbare Lösung dar, deren Nutzen nicht auf einen einzelnen Anwendungspartner beschränkt ist, sondern modellhaft für unterschiedliche Akteure und Regionen adaptiert werden kann.

#### **2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens**

Während der Projektlaufzeit wurden keine grundlegenden externen Entwicklungen bekannt, die die Durchführung des Projekts SICURA unmittelbar beeinflusst oder dessen Zielsetzung obsolet gemacht hätten. Der wissenschaftliche und technische Stand, an den zu Projektbeginn angeknüpft wurde, bleibt weiterhin gültig.

Gleichwohl sind begleitende Fortschritte auf dem Gebiet der bildbasierten Tiefenschätzung und der KI-gestützten Szenensegmentierung zu verzeichnen, insbesondere durch neue vortrainierte Modelle im Bereich der monokularen Tiefenrekonstruktion und semantischen Segmentierung. Diese Entwicklungen bestätigen grundsätzlich den im Projekt gewählten Ansatz, führten jedoch nicht zu einer substantziellen Änderung der Projektumsetzung, da die im Projekt eingesetzten Verfahren bewusst auf robuste, unter Realbedingungen validierbare Methoden ausgerichtet waren.

Darüber hinaus ist eine zunehmende gesellschaftliche und politische Aufmerksamkeit für Themen der Radverkehrssicherheit, Mindestüberholabstände und datenbasierte Infrastrukturplanung zu beobachten. Diese veränderten Rahmenbedingungen wirken sich positiv auf die Verwertbarkeit der Projektergebnisse aus, hatten jedoch keinen direkten Einfluss auf die technische Durchführung des Vorhabens.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass externe Fortschritte das Projekt SICURA nicht inhaltlich verändert, sondern vielmehr dessen Relevanz bestätigt und die Anschlussfähigkeit der Ergebnisse für Wissenschaft, Kommunen und Praxis weiter gestärkt haben.

#### **2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Ergebnisse des Projekts wurden in Form eines Posters auf der Konferenz Sensor and Measurement Science International, SMSI (06.05. – 08.05.2025) in Nürnberg unter dem Titel „Multi-sensor pothole detection and monitoring system“ (Autoren: Ivan Romero, Hubert Mantz, Thomas Walter und Michael Schneider, THU) präsentiert.

#### **2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit**

Die im Projekt SICURA durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die in der Vorhabenbeschreibung (Kapitel 6 „Notwendigkeit der Zuwendung“) formulierten Ziele zu erreichen. Die Entwicklung, der Aufbau und die Validierung einer mobilen Multisensorplattform zur Erfassung sicherheitsrelevanter Zustände der Radverkehrsinfrastruktur konnten weder aus der Grundfinanzierung der Hochschule noch durch bestehende Drittmittelprogramme realisiert werden. Insbesondere der experimentelle Charakter, die technische Unsicherheit in der Sensorfusion sowie der Aufwand für die Realerprobung im öffentlichen Raum machten eine projektgebundene Förderung erforderlich.

Der Umfang der geleisteten Arbeiten entsprach dem geplanten Innovationsgrad und war erforderlich, um belastbare Aussagen zur technischen Machbarkeit, Systemgrenzen und Weiterentwicklungspotenzialen zu gewinnen. Die eingesetzten personellen und sachlichen Ressourcen standen in einem angemessenen Verhältnis zu den erzielten Ergebnissen. Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan führten nicht zu Mehraufwänden ohne Mehrwert, sondern ermöglichten eine zielgerichtete Fokussierung auf die Validierung eines funktionsfähigen Prototyps und die Erreichung eines hohen technischen Reifegrades. Damit bestätigt der Projektverlauf die Notwendigkeit der Zuwendung und den sachgerechten Einsatz der Fördermittel.