

Schlussbericht zu FuE-Projekt

„AuRa – Autonomes Rad“

Förderrichtlinie	Grundsätze über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung intelligente Verkehrssysteme (IVS-Grundsätze)
Projektkronym	AuRa – Autonomes Rad
Projekttitel	Flexibler Einsatz autonomer Fahrradsysteme für Logistik- u. Beförderungsaufgaben

Angaben zum Einreicher des Schlussberichtes:

Firma / Institution	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg		
Adresse	Universitätsplatz, 2, 39106 Magdeburg		
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme, FG Autonome Fahrzeuge	Prof. Dr.-Ing. Stephan Schmidt	+49 391 67 52084 stephan.schmidt@ovgu.de, www.ims.ovgu.de	
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Lehrstuhl Logistische Systeme	Dr.-Ing. Tom Assmann	+49 391 67 52627 tom.assmann@ovgu.de, www.ilm.ovgu.de	
Fakultät für Naturwissenschaften, Institut für Psychologie, Lehrstuhl Umweltpsychologie	Prof. Dr. Ellen Matthies	+49 391 67 58470 ellen.matthies@ovgu.de, www.ipsy.ovgu.de	

Projektleitung

OVGU	Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme, FG Autonome Fahrzeuge		
Anrede	Herr	Vorname	Stephan
Titel	Prof. Dr.-Ing.	Nachname	Schmidt
Telefon	+49 391 67 52084	E-Mail	stephan.schmidt@ovgu.de

Laufzeit des Vorhabens: Geplante Dauer: **3 Jahre**, Laufzeit: **07/2019-06/2022 mit Verlängerung bis 30.09.2022**

Projektpartner:



Anmerkung: Im gesamten Dokument wird das Femininum verwendet. In dieser gewählten Nennung sind jedoch alle Geschlechtsverständnisse inbegriffen und mit gemeint.

Inhalt

1	Ergebnis der Forschung	1
1.1	Thema des Projektes/ Motivation	1
1.2	Durchgeführte Arbeiten, wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn und Innovativer Beitrag	2
1.3	Reduzierung der CO2-Emissionen	9
2	Nutzung und Einführung	10
3	Meilensteine und Finanzierungsplan	10
3.1	Meilensteine	10
3.2	Ausgaben und Finanzierungsplan	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendungsübergreifende Basisfunktionalität	1
Abbildung 2: Zeit und Arbeitsplan des Projektes „Aura“	11
Abbildung 3: Übersicht Finanzierungsplan des Projektes „Aura“	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: „AuRa“-Teilfunktionalitäten	2
Tabelle 2: Meilensteinplan	10

1 Ergebnis der Forschung

1.1 Thema des Projektes/ Motivation

Im Vorhaben „AuRa – Autonomes Rad“ wurden die wesentlichen Kernkomponenten entwickelt, die einen Proof-of-Concept ermöglichen und die damit Grundlage für neuartige Mobilitätslösungen auf Basis autonomer Mikromobile legen. Dies sind konkret:

- Das **autonome Rad**, ausgeführt als dreirädriges Lastenrad, welches auf Gehwegen und Radverkehrsinfrastrukturen sich selbstständig orientieren und fahren kann
- Ein **Ruf-Dienst** per App mit welchen Nutzerinnen das Rad zu sich oder an bestimmte Stationen des ÖPV bestellen können. Nach der Nutzung wird es entlassen und kehrt zum Ausgangspunkt zurück.
- Ein **Betriebskonzept** in dem die erweiterten Komponenten für das Gesamtsystem (Stationen, Betriebsführung, Energieversorgung) spezifiziert sind, um vom Markt beschafft zu werden
- Ein **Handlungsleitfaden zur Akzeptanz** für Anwender*innen und den internen Entwicklungsprozess mit dem eine nutzerinnenzentrierte Gestaltung des Rads sowie gesellschaftlich akzeptiertes Fahrverhalten erzielt werden.
- Ein **Rechtsgutachten** mit dem die rechtlichen Barrieren und Wege zu deren Überwindung für eine Markteinführung aufgezeigt werden.

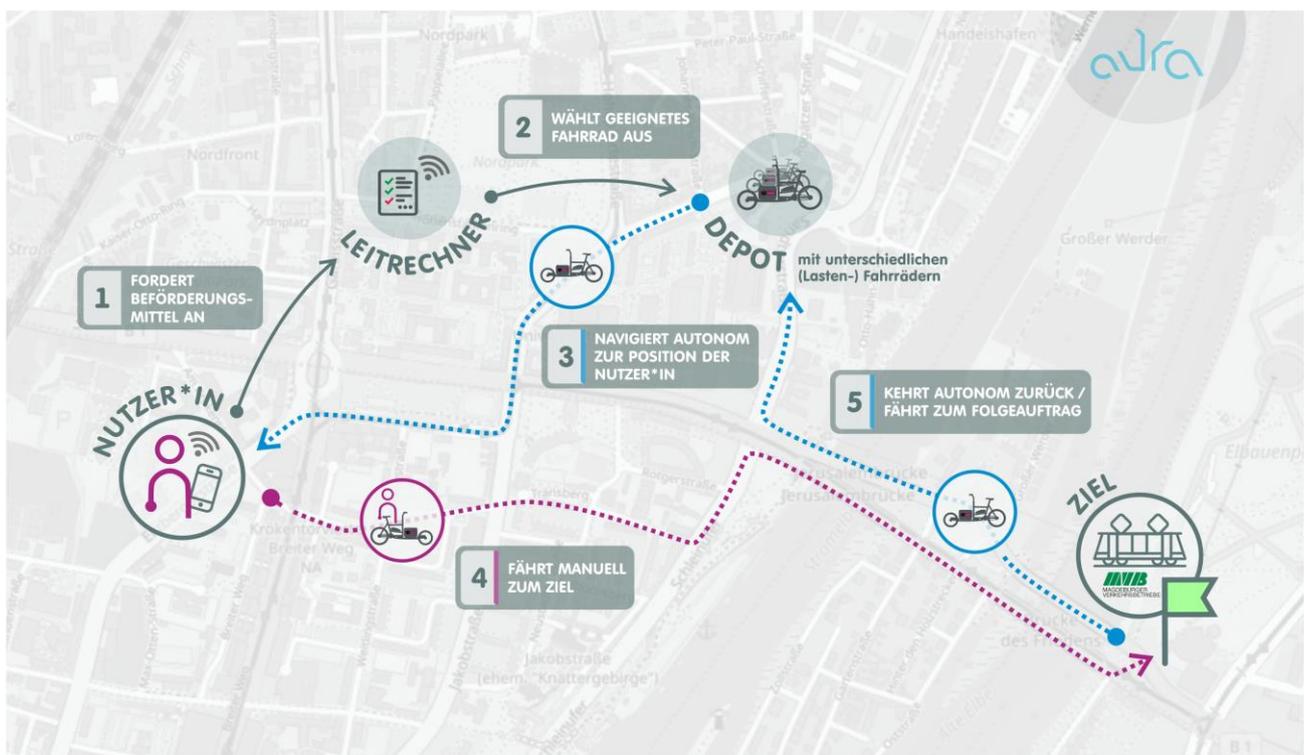


Abbildung 1: Anwendungsübergreifende Basisfunktionalität

Das AuRa-System besteht im Wesentlichen aus den verschiedenen Entitäten des autonomen Lastenrades. Das spätere Marktsystem verfügt zudem über ein übergeordnetes Leit- und Steuersystem, welches das Verkehrssystem orchestriert und die Schnittstelle zu einem bestehenden Verkehrsleitsystem herstellt. Im Detail werden auf technischer, betriebs- und sozialwissenschaftlicher sowie rechtlicher Ebene folgende Teilfunktionalitäten bearbeitet:

Tabelle 1: „AuRa“-Teilfunktionalitäten

Forschungsfelder	Funktionalität
T1 - Entwicklung und Realisierung der autonomen Fahrfunktion	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrradsteuerung zur Realisierung des autonomen Fahrens auf der Radweginfrastruktur unter enger Interaktion zwischen autonomen Lastenrädern und Passantinnen - Systemkonzept zur Über-/Rückübergabe zwischen Nutzerin und automatischer Steuerung - Variables Geschwindigkeitsprofil mit bis zu 25 km/h zur Maximierung der Verfügbarkeit
T2 – Betriebsstrategie und Betriebsführung	<ul style="list-style-type: none"> - Koordinationsebene für effiziente Bereitstellung, Wartung, Vernetzung mit ÖPNV und Rücknahme - Betriebswirtschaftlich sinnvolles Setup zur Steigerung der Verwertbarkeit
T3 - Akzeptanz- und Verhaltensforschung; juristische und ethische Fragestellungen	<ul style="list-style-type: none"> - Akzeptanz- und bedarfsorientierte Systemgestaltung - Mensch-Maschine-Schnittstellen zur sicheren Interaktion mit Nutzerinnen und Umfeld - Sicherheitsorientiertes Verkehrsverhalten - Rechtliche Absicherung der experimentellen Evaluation im öffentlichen Verkehrsraum - Weiterentwicklung des (Grund-)Rechtsrahmens zur Steigerung der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit

Wo es möglich war, orientierte sich das interdisziplinäre Projektteam an erprobten Lösungen aus dem Stand der Forschung und entwickelte diesen in wesentlichen Punkten entscheidend weiter.

Aus der Beantwortung aller Forschungsfragen wurde im Projekt von „AuRa“ ein **autonomes Lastenrad**, entlang konkreter Akzeptanzmerkmale entwickelt, das die Grundlage für ein **intelligentes Verkehrssystem** kooperierender Fahrzeuge bilden und in Verbindung mit dem ÖPNV neue, attraktive, durch die Nutzerin individuell anpassbare Wegketten des **Umweltverbunds** ermöglichen kann, um nachhaltig **CO₂ zu mindern**.

1.2 Durchgeführte Arbeiten, wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn und Innovativer Beitrag

Im Rahmen des **Teilprojektes 1 „Entwicklung und Realisierung der autonomen Fahrfunktion“** wurde eine Flotte von insgesamt 5 Versuchsträgern mit Komponenten und Funktionen zum automatischen Fahren ausgerüstet und eine Demonstrationsstrecke auf dem Campus der Otto-von-Guericke Universität eingerichtet. Hierzu wurden durchweg 9 Arbeitspakete bearbeitet, wobei das AP 9 als Ergänzung zum ursprünglichen Antrag hinzugefügt wurde.

AP 1.1 Konzeption

Aufgabe des AP 1.1 war die Erarbeitung eines Anforderungskataloges für das avisierte Ruf- und Leitsystem für autonome vernetzte E-Bikes sowie die Spezifikation von Schnittstellen im Bereich Hard- und Software sowie zu den angeschlossenen Teilbereichen. Hierzu wurden zunächst verschiedene Szenarien für den Betrieb automatisierter Lastenräder definiert, um daraus elektrische und mechanische Anforderungen an das mechatronische System, die Sensorik sowie die Umgebungswahrnehmung abzuleiten. Des Weiteren wurden Funktionen des Backend als zentrale Organisations- und Verarbeitungsinstanz definiert. Im Ergebnis des AP stand ein Anforderungskatalog bereit, der die Grundlage für die weitere technische Entwicklung und der Ausschreibung von Drittanbieterdienstleistungen bildete.

AP 1.2 Sensorik und Sensordatenverarbeitung

Ziele des AP 1.2 waren der Aufbau einer Fahrzustandsbeobachtung zur Rekonstruktion fahrdynamisch relevanter Zustandsgrößen, eines Moduls zur Lokalisation sowie zur Umgebungswahrnehmung. Die Fahrzustandsschätzung greift auf fahrzeuginterne Messgrößen zurück und rekonstruiert aus diesen den gesamten Bewegungszustand des Fahrzeuges, mit der Information der Lidar-Lokalisierung steht damit eine robuste und hochgenaue Eingangsgröße für die unterlagerte Fahrzustandsregelung zur Verfügung. Im Rahmen der Lokalisierung wurden verschiedene Ansätze wie etwa eine auf künstlichen Landmarken basierende sowie verschiedene Lidar-Slam-Lösungen erprobt. Im Ergebnis konnte eine für das Experimentalumfeld ausreichende Genauigkeit von bis zu 2 cm erreicht werden. Die Module zur Umfeldwahrnehmung wurden im Wesentlichen im Rahmen einer Beauftragung durch die Fusion Systems GmbH erstellt und vom IMS als Projektpartner koordiniert.

niert. Ziel war der Aufbau einer Verarbeitungskette bestehend aus Objektdetektion, -tracking und -fusion mittels Kamera und Lidar. Im Rahmen des Projektes stand frühzeitig eine Basisfunktionalität bereit an der sich die weitere technische Entwicklung ausrichten konnte. Diese Basisfunktionalität wurde über die gesamte Projektlaufzeit kontinuierlich weiterentwickelt und evaluiert.

AP 1.3 Welt- und Kartenmodelle

Ziel des AP 1.3 war der Aufbau einer globalen Wissensbasis in Form einer Umgebungskarte, diese enthält Informationen über die vorhandene Infrastruktur, befahrbare Bereiche sowie etwaige Verkehrsregeln. Im Ergebnis des Projektes sind mehrere Kartenebenen entstanden, die verschiedene Domänen abbilden und für verschiedene Aufgaben, wie etwa die globale Planung oder die Lokalisierung genutzt werden. Die Grundlage der Fahrfunktion bildet eine Lanelet-Karte des Universitätscampus sowie der angeschlossenen Bereiche.

AP 1.4 Infrastruktur

Ziel des AP 1.4 war die Realisierung des Backend. Dieses orchestriert einerseits die verschiedenen autonomen Entitäten, d.h. weist Fahraufgaben an einzelne Fahrräder zu. Andererseits dient das Backend als globaler Datenspeicher für die während der Messfahrten aufgenommenen Datensätze. Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt Messdaten in einer Größenordnung von 100 TB aufgenommen, die für die Algorithmenentwicklung genutzt wurden und dauerhaft archiviert werden. Teil des AP 1.4 waren zusätzlich der Aufbau von Kommunikationskanälen für den kabellosen Datentransfer sowie Mechanismen zur einfachen Verwaltung von Messung und Datensätzen.

AP 1.5 Prädiktion

Ziel des AP 1.5 war der Aufbau eines Prädiktionsmoduls zur Vorhersage von zukünftigen Passentenverhalten. Diese Information bildet eine wichtige Grundlage für die kollisionsfreie Bewegungsplanung. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu zwei Ansätze implementiert und evaluiert. Der erste basiert auf verschiedenen Bewegungshypothesen und gleicht vorhandene Messdaten mit diesen ab, um aus verschiedenen alternativen Hypothesen eine Vorzugsvariante zu definieren. Der zweite Ansatz nutzt Methoden des maschinellen Lernens, um aus den eingefahrenen Bewegungsdaten Bewegungshypothesen und deren zugehörigen Unsicherheiten zu schätzen. In der aktuellen Implementierung wird der erste Ansatz als Basisfunktionalität genutzt, während der zweite Ansatz anhand öffentlich zugänglicher Daten trainiert wurde und eine finale Implementierung und Testung noch aussteht.

AP 1.6 Sicherheitsstrategie

Ziel des AP 1.6 war die Definition und Umsetzung eines Sicherheitskonzeptes, welches einen zulassungsfähigen Testbetrieb im Rahmen des Projektes erlaubt. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, was auch verschiedenen Eskalationsstufen (Soft-ES, Hard-ES, ...) basiert und deren Kernelement die permanente Überwachung des Fahrzeuges durch zwei Sicherheitsbegleiter mittels Funkfernbedienung und Funknotaus. Die Sicherheitsstrategie sowie die Fahrzeuge selbst wurden durch die Dekra als technischen Dienst abgenommen und durch das Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt eine Ausnahmegenehmigung nach §70 StvZO erteilt. Die Ausnahmegenehmigung erlaubt den Testbetrieb der Fahrzeuge auf dem Universitätscampus mit einer Geschwindigkeit von bis zu 6 km/h.

AP 1.7 Verhaltensaushplanung

Ziel des AP 1.7 war die Definition einer kollisionsfreien, risikominimalen Fahrtrajektorie welche das Fahrzeug vom Start zum gewünschten Ziel führt. Hierzu wurde ein optimierungsbasierter Bewegungsplaner implementiert, der über die Berücksichtigung eines Bewegungsmodells eine jederzeit realisierbare Trajektorie definiert und über die Berücksichtigung weiterer Kriterien im Gütefunktional eine komfortoptimale und akzeptanzmaximale Fahrweise erlaubt. Der Bewegungsplaner sucht hierzu in der bereitgestellten Kartenbasis innerhalb der Fahrbahnbegrenzungen eine Optimaltrajektorie und berücksichtigt dabei auch aktuelle statische und dynamische Hindernisse auf der Fahrbahn. Stabilisiert wird die Trajektorie durch einen unterlagerten Regelungsalgorithmus, der externe Störungen kompensiert und über ein Rapid-Control-Prototyping Steuergerät mit der Aktorebene kommuniziert.

AP 1.8 Integration und Test

AP 1.8 fasste verschiedene Aktivitäten von der Realisierung einzelner Aktorkomponenten, bis zum Aufbau von 3 Generationen (P0, P1, P2) von Fahrradprototypen sowie deren Test und Erprobung zusammen. Insgesamt konnten 5 verschiedene Fahrradversuchsträger aufgebaut und intensiv getestet werden. Den Abschluss des AP bildet eine Abschlussveranstaltung unter Beteiligung verschiedener Ministerien des Landes Sachsen-Anhalt, des Projektträgers sowie einer großen Anzahl verschiedener Gäste, auf der die Funktionsfähigkeit des Ansatzes gezeigt werden konnte.

AP 1.9 Design, Ergonomie und Interaktion

Im AP 1.9 wurden verschiedene Aktivitäten rund um Design, Ergonomie sowie Interaktion des Lastenrades mit seiner Umgebung zusammengefasst. So wurde ein Ergonomiekonzept erarbeitet, welches die Weiterentwicklung von automatisierten Mikromobilen unter Aspekten von Nutzenden erlaubt. Beispielsweise wird der

Gepäcktransport ermöglicht und eine ergonomische Anpassung der Sattelhöhe eingerichtet. Für letzteres wurde im Rahmen des Projektes der „E-Bike Memory-Seat“ entwickelt. Des Weiteren stand die Interaktion des Fahrrades mit seinen Nutzern über ein Multifunktionsdisplay sowie mit externen Passanten über LED-Leuchtstreifen und akustische Signale im Fokus der Entwicklung. Das Interaktionskonzept ist in mehreren internationalen Veröffentlichungen dokumentiert.

Das Teilprojekt 2 „Entwicklung von Betriebsstrategien und operative Betriebsführung“ hatte zum Ziel, die Anwendungs- und Implementierungsfähigkeit von AuRa in organisatorischer und wirtschaftlicher Hinsicht zu erzeugen und wurde erfolgreich abgeschlossen. Innerhalb des Teilprojekts wurde sowohl disziplinär im Bereich Logistik, speziell Verkehrslogistik, als auch interdisziplinär gearbeitet. Dabei ist vor allem die disziplinübergreifende Zusammenarbeit mit der Umweltpsychologie bei der Erstellung der Mobilitätsbedarfserhebung und der anschließenden Auswertung der erhobenen Daten für die Vorhersage der AuRa-Nutzung sowie der Fahrzeugentwicklung (Institut für Mobile Systeme) bei der Bearbeitung von Schnittstellen zwischen Betriebsführung und Fahrzeug (z.B. Interaktion Routing und Pfadplanung), der Untersuchung geeigneter Energieversorgungstechnologien und der Entwicklung entsprechender Stationsmodelle (Warte- und Ladestationen) hervorzuheben.

Das Teilprojekt war in insgesamt drei Arbeitspakete gegliedert, welche wiederum in mehrere Teilarbeitspakete unterteilt waren. Die Arbeitsinhalte und Ergebnisse der einzelnen (Teil-)Arbeitspakete werden nachfolgend zusammengefasst.

AP 2.1 Konzeption

Das AP 2.1 ist in zwei TAPs untergliedert und hatte zum Ziel, konkrete Anwendungsszenarien für die Markteinführung zu definieren und kritische Fahrzeug- und Dienstparameter für Wirtschaftlichkeit und Betrieb festzulegen.

In dem TAP 2.1.1 wurde zunächst das Anwendungsszenario ausgearbeitet. Basierend auf Literatur zu bestehenden Bikesharing-Systemen wurden dafür verschiedene Anwendungen generisch in Bezug auf Nutzerinnen, Dienstleistungsangebot, abzudeckende Wege und Wegzwecke bestimmt und anschließend im Rahmen eines Workshops mit Anwendungs- und Entwicklungspartnern ausgearbeitet. Basierend auf den resultierenden Anwendungsszenarien konnten wesentliche Anforderungen für die Gestaltung des Bikesharing-Systems und zu technischen Lösungen bezüglich des Fahrzeugs und der autonomen Fahrfunktionen abgeleitet und weiterfolgenden TAPs zugeordnet werden.

Auf Grundlage der avisierten Anwendungsszenarios wurden im TAP 2.1.2 durch Aufstellen von Prozessketten der Nutzung (User Experience) wesentliche Schnittstellen zwischen Betrieb/Wirtschaftlichkeit und dem Fahrzeug identifiziert und bewertet. Diese umfassen insbesondere die Interaktion zwischen dem Routing in der Auftragsplanung und der Pfadverwaltung des Fahrzeugs, die Übergabe von Aufträgen von der Betriebsführung zu den einzelnen Fahrzeugen sowie die Gestaltung von Stationen. Weiterhin erfolgte eine holistische Systembeschreibung des Anwendungssystems, anhand derer Wechselwirkungen innerhalb des Systems sowie zwischen technischer Fahrzeugausstattung und der Wirtschaftlichkeit/Implementierbarkeit identifiziert und in Hinblick auf ihre Relevanz für das Gesamtsystem bewertet wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gingen in Form einer dokumentierten Schnittstellenspezifikation der Software und Hardwaremodule in Fahrzeug und Backend in die Entwicklungsarbeit nachfolgender TAPs ein.

AP 2.2 System Set-Up und Betriebsstrategien

Das AP 2.2 zielte auf die Entwicklung eines Betriebskonzepts, welches die Gestaltung peripherer Komponenten wie Stationen und Energieversorgung definiert, sowie die Darstellung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit von AuRa und deren Voraussetzungen ab. Insgesamt umfasst das Arbeitspaket 6 Teilarbeitspakete.

Das TAP 2.2.1 umfasste die Entwicklung einer holistischen, strukturierten System- und Prozessbeschreibung des AuRa Bikesharing-Systems auf konzeptioneller Ebene. Dafür wurden zunächst die Erkenntnisse aus der vorausgegangenen Konzeptionsphase in eine einheitliche und standardisierte Beschreibungsform überführt und mit den zu simulierenden Komponenten unterlegt. Weiterhin erfolgte die Bildung von Modulen sowie deren zweckmäßige Abgrenzung und Schnittstellendefinition. Auf Basis der getroffenen Definitionen wurden anschließend die wesentlichen Festlegungen zu den grundlegenden Paradigmen der Simulation (d.h. Simulationstiefe, Simulationszeit, fixe Inputs, Wechselwirkungen) für das Simulationsmodell getroffen. Die Ergebnisse des TAPs wurden auf der Konferenz „5th Conference on Sustainable Urban Mobility“ in 2020 vorgestellt und diskutiert sowie im Jahr 2021 als Buchbeitrag mit Scopus-Indizierung veröffentlicht.

Im TAP 2.2.2 wurde das konzeptionelle Modell zunächst durch dessen mathematische Beschreibung in ein formales Modell überführt. In einem zweiten Schritt wurde das konzeptionelle Modell anschließend in einem ausführbaren Simulationsmodell technisch umgesetzt. Als Simulationswerkzeug wurde die Simulationssoftware AnyLogic Professional genutzt. Um den modularen Charakter des Grundmodells sowie die Interaktion einzelner Module untereinander abzusichern, wurde dabei abweichend von dem in TAP 2.2.1 entwickelten ursprünglichen konzeptionellen Modell ein zusätzliches zentrales Verwaltungsmodul implementiert. Die Ergebnisse des TAPs, speziell die Implementierung des Grundmodells wurden auf der Konferenz „Information Control Problems in Manufacturing“ in 2021 vorgestellt und diskutiert und anschließend als Journal-Bertrag veröffentlicht.

Im Rahmen des TAPs 2.2.3 wurden verschiedene Szenarien für die Nutzung der AuRa-Bikes entwickelt und in das Simulationsmodell integriert. Die Datenintegration erfolgte mithilfe eines dafür aufgesetzten Datenbanksystems sowie der Implementierung entsprechender Schnittstellung zwischen Datenbank und Simulationsmodell. Für die Entwicklung der einzelnen Nachfrageszenarien wurde eine Toolchain entwickelt, welche aus den Ergebnissen der in AP 3.4 durchgeführten Mobilitätsbedarfserhebung, bestehenden Datensätzen zu konventionellen Bikesharing-Systemen, Wetterdaten und dem Verkehrsmodell des Anwendungsgebiets Magdeburg eine zeitlich und räumlich diskontinuierliche stochastische Verteilung an Nutzerinnen erzeugt. Dadurch wurde eine stundenfeine Vorhersage des AuRa-Verkehrsflusses zwischen den einzelnen Verkehrszellen der Stadt für ein Jahr ermöglicht. Um den Simulationsaufwand zu verringern wurde außerdem im Rahmen einer Clusteranalyse ermittelt, inwiefern sich der Jahresverlauf über wenige, repräsentative Wochen ausdrücken lässt. Die Ergebnisse des TAPs wurden in 2022 auf der Konferenz „6th Conference on Sustainable Urban Mobility“ vorgestellt.

Im TAP 2.2.4 wurde das Stationsmodul erarbeitet und in das Simulationsmodell integriert. Außerdem wurden Designstudien für die einzelnen Stationen erstellt. Im Vergleich zu herkömmlichen wissenschaftlichen Problemstellungen war es dabei erforderlich, zwischen zwei verschiedenen Stationstypen, Warte- und Ladestationen, zu unterscheiden. Bei Ladestationen war es zudem notwendig, die Untersuchung der verschiedenen Energieversorgungstechnologien (TAP 2.2.5) zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass für den Stationstyp Ladestation entsprechend der verwendeten Energieversorgung unterschiedliche Parametersets implementiert werden mussten. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Strategien zur räumlichen Verteilung der Stationen untersucht. Die Ergebnisse des TAPs wurden auf der Konferenz „6th Conference on Sustainable Urban Mobility“ vorgestellt.

Innerhalb des TAPs 2.2.5 wurden auf Basis bestehender bzw. realistisch umsetzbarer Technologien Szenarien für die Energieversorgung der AuRa-Bikes entworfen. Dabei wurden die Technologien induktives und induktives Laden, Wechselakkusysteme sowie das Wasserstoffsystem PowerPaste verglichen. Für den Vergleich wurde zunächst eine umfangreiche Marktrecherche von marktüblichen und in Entwicklung stehenden Technologien sowie deren Leistungs- und Kostenparametern durchgeführt. Anschließend wurden die genannten Vorzugstechnologien sowohl fahrzeugseitig als auch stationsseitig im Simulationsmodell abgebildet. Eine besondere Herausforderung war dabei die Interaktion mit der Stationsverteilung (TAP 2.2.4). Die Ergebnisse des TAPs sind zur Präsentation bei der Konferenz „Transport Research Arena 2022“ eingereicht.

Im Rahmen des TAPs 2.2.6 wurden die Untersuchungen der vorausgegangenen TAP zu einer einheitlichen monetären Betrachtung zusammengeführt.

AP 2.3 Operative Betriebsführung

Ziel des APs 2.3 war die Entwicklung von zuverlässigen, schnellen und multikriteriellen Verfahren zum operativen Routing der AuRa-Bikes. Darüber hinaus wurde die Entwicklung von schnellen und effizienten Verfahren zur operativen und strategischen Redistribution der AuRa-Bikes avisiert. Das AP 2.3 umfasst insgesamt drei TAP.

Im TAP 2.3.1 fand die Entwicklung der Verfahren zum operativen Routing der Fahrzeuge statt. Speziell ermöglichen die Verfahren, dass ein Fahrzeug vor einer Fahrt mit einer geeigneten Strecke auf der Kartenumgebung OpenStreetMap geplant wird. Dafür wurden zunächst auf Basis der in AP 2.1 festgelegten Anwendungsszenarien und Schnittstellen und unter Berücksichtigung von bestehendem Wissen aus dem Bereich Operations-Research Anforderungen an das Routing ermittelt. Speziell wurde ein Set an Umweltfaktoren aufgestellt, mithilfe dessen sich die Zuverlässigkeit des operativen Routings bestimmen lässt. Anschließend wurden über eine umfangreiche Literaturrecherche geeignete Routing-Algorithmen und Tools ermittelt und unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Anforderungen qualitativ und quantitativ auf ihre Eignung überprüft. Eine große Herausforderung bestand dabei in der aufgrund der eingeschränkten Datenqualität und -aktualität mangelhaften Abbildung der Umweltfaktoren im Kartenmaterial von OpenStreetMap. Das Set der Umweltfaktoren musste daher auf den in OpenStreetMap gedeckten Teil reduziert werden. Aus den untersuchten Algorithmen und Tools wurden zwei Verfahren mit einer hohen Eignung ausgewählt, in die Programmiersprache des Simulationstools AnyLogic überführt und auf ihre Güte in der Routenwahl verglichen. Final wurde ein Routing-Algorithmus ausgewählt, der auf Basis der quelloffenen Routing-Software Graphhopper basiert. Dieser wurde für den Anwendungsfall der autonomen Lastenräder modifiziert und in das Simulationsmodell integriert. Die Ergebnisse des TAPs waren ein wesentlicher Ausgangspunkt für die simulativen Untersuchungen, die in den nachfolgenden (Teil-)Arbeitspaketen durchgeführt wurden.

Im TAP 2.3.2 wurde ein Verfahren zur effizienten und automatisierten Redistribution der AuRa-Bikes im operativen Betrieb entwickelt. Dafür fand auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche die Entwicklung von Matching- und Rebalancing-Algorithmen sowie deren Integration in das Simulationsmodell statt. Für das Rebalancing wurden dabei verschiedene Strategien entwickelt und qualitativ beschrieben. Diese besagen, dass ein Rebalancing entweder nach einem bestimmten Zeitintervall, nach dem Abschluss einer Fahrt oder durch eine Kombination aus beiden zuvor genannten Optionen erfolgt. Zur Ermittlung einer für den Anwendungsfall AuRa optimalen Strategie wurden die verschiedenen Optionen unter Berücksichtigung des Prognosemodells für die Nachfrage (TAP 2.2.3) im Simulationsmodell umgesetzt und untersucht. Die einzelnen Strategien sowie

deren Auswirkungen auf die Performance des AuRa Systems sind für den Anwendungsfall Innenstadt wurden 2021 im Rahmen einer Publikation im Journal „Future Transportation“ beschrieben. Die Ergebnisse für die Gesamtstadt wurden 2021 auf der Konferenz 15th International „Congress of Logistics and SCM Systems“ vorgestellt und 2022 als Beitrag im Journal „Sustainability“ veröffentlicht.

Das **Arbeitspaket 3 „Akzeptanz- und Verhaltensforschung; Mobilitätskonzept“** im Rahmen bestehender Mobilitätsbedürfnisse wurde erfolgreich abgeschlossen.

AP 3.1 Konzeption

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden vor allem zwei Teilschritte verfolgt. Zum einen wurden Szenarien, zum anderen Schnittstellen definiert. Zu Ersteren erfolgte die Festlegung der Szenarien planmäßig im zweiten Halbjahr 2019. Die Auswahl wurde mit den übrigen Teilprojekten abgestimmt. Da die meisten der Projektmitarbeiter*innen ihre Tätigkeit später aufgenommen haben als ursprünglich geplant, verzögerten sich die Arbeiten geringfügig. Die Auswahl erfolgte etwas später als ursprünglich angesetzt (im Oktober 2019, statt im August 2019). Dies hatte jedoch keine Auswirkungen auf den Gesamtarbeitsplan.

Die Schnittstellendefinition und -abstimmung mit den Teilprojekten erfolgte in der Konzeptionsphase wie geplant. Dabei war die Abstimmung der Zeitpläne und Schnittstellen jedoch ein kontinuierlicher Prozess, der über die gesamte Projektlaufzeit erfolgte.

AP 3.2 Juristische und ethische Rahmenbedingungen

Die Analyse des bestehenden Rechtsrahmens wurde planmäßig initiiert bzw. für externe Partner*innen mit juristischer Expertise ausgeschrieben. Beauftragt wurde die Kanzlei „GSK Stockmann“. Das Gutachten wurde in der ersten Jahreshälfte 2020 erstellt, an das Projektteam übergeben und gesichtet. Zusätzlich erfolgt eine Beratung seitens der Kanzlei in juristischen Fragestellungen. Das Gutachten wurde nach Rückfragen der Projektmitarbeiterinnen teilweise ergänzt, die Ergebnisse lagen dem gesamten Projektteam vor.

AP 3.3 Akzeptanz Nutzerinnen

Dieses Arbeitspaket richtete den Fokus auf die Untersuchung, ob künftige Nutzerinnen das autonome Rad annehmen, also akzeptieren würden. In diesem Forschungsbereich konnte über die Projektlaufzeit kontinuierlich der Erkenntnisstand erweitert werden. In den Projektjahren 2019 und 2020 fanden dazu grundlegende inhaltliche Recherchen sowie eine Vorauswahl relevanter Aspekte, die eine adäquate Erhebung der Nutzerinnenakzeptanz des autonomen Lastenrades einerseits sowie der Buchung / Mensch-Technik-Schnittstelle des Aura-Systems, etwa über eine geplante App, vorbereiteten. Schnittstellen gab es hier zu den TAPs 3.4 und 3.5, da in arbeitspaket-übergreifenden Erhebungen Daten gesammelt wurden. Dazu wurde vor allem – nach grundlegender Information über das Vorhaben in Aura – ermittelt, wie wahrscheinlich das Aura-System genutzt werden würde. Die Erhebungen zeichneten dazu ein durchweg positives Bild, z.B. gaben im Rahmen der Mobilitätsbedarfserhebung (TAP 3.4) von den 1118 Befragten 10,5% an, dass für sie eine Nutzung sehr wahrscheinlich wäre, weitere 30,22% sahen die Nutzung als eher wahrscheinlich an. 24,49% waren unentschieden, während 23,52% eine Nutzung für eher nicht wahrscheinlich, 11,27% für gar nicht wahrscheinlich hielten. Dieses Ergebnis konnte in den folgenden Erhebungen, z.B. im Elbedome 2020 oder in der zweiten Fragebogenwelle 2021 validiert werden, die Nutzungsintention blieb in einem vergleichbaren Bereich. Für die Nutzungsintention weiterhin relevant war ebenfalls die Ermittlung gewünschter Wegezwecke. Hierzu wurden Erhebungsinstrumente in Abstimmung mit dem ILM (logistische Perspektive) entwickelt und ausgewertet.

Zum Aura-System gehörte ebenfalls die Entwicklung und Erforschung eines Ruf-Dienstes, was der zweite inhaltliche Schwerpunkt von TAP 3.3 war. Hierzu wurden insgesamt drei Studien durchgeführt. Deren Hauptziel war es, Anforderungen, Erwartungen und Mobilitätsbedürfnisse potentieller Nutzerinnen sowie deren Motivation für die Nutzung des Rufsystems zu identifizieren. Ebenso war relevant, die dazugehörige mobile Applikation bzw. deren Prototypen auf ihre Gebrauchstauglichkeit (Usability) hin zu testen. Zur Beantwortung der Fragen wurden zunächst Fokusgruppen durchgeführt (Planungszeit Oktober 2020 – März 2021; Durchführung und Auswertung März - Juli 2021; N = 57), während zeitgleich ein Prototyp für eine mobile Applikation (November 2020 - Februar 2021) entwickelt wurde. Die Fokusgruppen explorierten neben wahrgenommenen Sicherheitsaspekten und der Akzeptanz des autonomen Rades auch infrastrukturelle und persönliche Rahmenbedingungen, Wünsche und Erwartungen potentieller Nutzerinnen als Voraussetzung für deren Bereitschaft zur Nutzung. Zudem wurde das Format dazu genutzt, erste Rückmeldungen zum Prototyp der mobilen Applikation einzuholen. Diese wurden genutzt, um den Prototyp weiterzuentwickeln und schließlich zu einer ersten Usability Testung (N = 147; April 2021 - Januar 2022) sowie der Weiterentwicklung der finalen Applikation zu gelangen. Relevante Erkenntnisse wurden an die entsprechenden Projektpartner (Technik, IT, etc.) kommuniziert. Pandemiebedingt mussten diese Studien in ein Online-Format übertragen werden. Insgesamt führte dies zu einer Zeitplanverschiebung von 2,5 Monaten (z.B. zur Erstellung eines Videoclips zur Vorführung des Ruf-Systems, statt einer Vorführung in realiter). Aufbauend auf den Fokusgruppenstudien wurde 2021 noch eine zusätzliche, quantitative Online-Studie (N = 412) durchgeführt, um die Erkenntnisse aus den qualitativen Daten zu validieren und zu vertiefen (Januar 2022). Die Auswertungen - auch für die Usability Testung - erfolgten in 2022. Die Ergebnisse zeigten grundsätzlich eine gute bis sogar exzellente Usability der App, die „Aufgaben“, die mittels der App bewältigt wurden – etwa Buchung eines Rades, „unlocking“ des Rades, Verlängerung der Ausleihdauer etc., konnten vom Großteil der Probandinnen erfolgreich abgeschlossen werden.

Weiterhin konnten Wünsche für eine Weiterentwicklung der App, etwa eine Verknüpfung mit lokalen ÖPNV-Angeboten, herausgefunden werden. Die Ergebnisse geben somit eine solide Basis, die App für den realen Betrieb zu entwickeln und zu optimieren.

Die ZPVP übernahm im Zuge eines Dienstleistungsauftrages die wissenschaftliche Begleitung der Analyse und Umsetzung der Nutzerinnen-Bedürfnisse. Dies beinhaltet die Forschungsarbeiten zu den Themen Mobilitätsbedürfnisse der Zukunft und Nutzerakzeptabilität autonomer Kleinfahrzeuge sowie die Koordination der Zusammenarbeit mit anderen Fachdisziplinen (wie z. B. benutzerinnenzentriertes Design) und der Erarbeitung wissenschaftlicher Publikationen.

Die Rekrutierung erfolgte für alle Studien über verschiedene Erhebungsplattformen, Social-Media-Kanäle sowie über eine Zeitungsannonce im Lokalblatt in Magdeburg. Die Teilnehmenden erhielten eine entsprechende Aufwandsentschädigung.

AP 3.4 Mobilitätsbedarfserhebungen und Handlungsempfehlungen

Hier wurde 2020 eine umfangreiche Erhebung durchgeführt, die auf Magdeburger Bürgerinnen fokussierte, die deutschlandweit als erste Personen mit dem Aura-System in Kontakt kommen und es nutzen werden. Dazu wurden zunächst über das Einwohnermeldeamt Magdeburg und mit Unterstützung einer Druckerei 6000 Magdeburgerinnen postalisch zur Teilnahme an der Befragung eingeladen. Die anvisierte Stichprobengröße betrug $n = 600$ Personen. Da die erhoffte Rücklaufquote zunächst unter den Erwartungen weit zurückblieb, führte das Projektteam weitere Rekrutierungen durch. Hilfswissenschaftlerinnen verteilten an belebten Orten entsprechende Aushänge. Zusätzlich wurde per Ausschreibung in der Zeitung „Volksstimme“ ein Inserat platziert. Letztendlich konnten $n = 593$ über die Postwurfsendung erreicht werden, $n = 25$ über die Aushänge und weitere $n = 163$ durch das Inserat. Die Teilnahme wurde mit einer Aufwandsentschädigung vergütet. Um eine Vergleichbarkeit der Magdeburger Stichprobe mit einem Gesamtdeutschen Sample herzustellen, wurde zusätzlich eine für Alter und Geschlecht repräsentative Vergleichsstichprobe von $n = 335$ Personen erworben. Da Ausschreibungsprozesse einen entsprechenden Verwaltungsaufwand mit sich bringen, verzögerte sich die Erhebung dadurch geringfügig. Im Ausschreibungsprozess wurden fünf Unternehmen kontaktiert, von denen vier ein Angebot sendeten. Nach eingehender Prüfung konnte der Auftrag an das Unternehmen „Respondi“ erteilt werden. Die Teilnehmerinnen dieser Stichprobe füllten den gleichen Fragebogen wie die Magdeburger Stichprobe aus, in dem jedoch Orts-spezifische Formulierungen, die sich auf Magdeburg bezogen, entsprechend ersetzt wurden.

Der Fragebogen wurde Online zur Verfügung gestellt und nahm ca. 40 Minuten Bearbeitungszeit in Anspruch. Die Teilnehmerinnen konnten entweder dem Link folgen (per QR-Code oder Eingabe) und den Fragebogen direkt ausfüllen, oder sie konnten mit Mitarbeiterinnen und Hilfswissenschaftlerinnen des Projektteams einen Telefontermin vereinbaren und den Fragebogen so per Telefon beantworten. Ziel war, möglichst wenige Personen von der Befragung auszuschließen. Zu Beginn wurden allgemeine demografische Daten, wie Alter, Geschlecht und Bildung sowie Angaben zur persönlichen Mobilität erfasst (z.B. Besitz von Fahrrad/Auto/Führerschein, Entfernung und Nutzung von ÖPNV). Im weiteren Verlauf des Fragebogens wurden zumeist Aussagen vorgegeben, die die Teilnehmenden auf einer fünf-stufigen Skala von „Stimme überhaupt nicht zu“ bis „Stimme voll und ganz zu“, bewerten sollten. Im ersten inhaltlichen Teil des Fragebogens ging es um psychologische Einflussfaktoren, die die Verkehrsmittelwahl beeinflussen (z.B. Einstellungen zum Rad- und Autoverkehr, moralische Einstellungen zu klimaschonenden Verkehrsmitteln, oder allgemeine Lebensprinzipien). Dabei wurden Fragensets, die sich bereits in psychologischen Untersuchungen etabliert haben, verwendet. Eine Auswahl davon wäre: „Aufgrund meiner persönlichen Werte fühle ich mich verpflichtet, das Auto so wenig wie nötig zu nutzen.“, oder „Ich bin generell von einem eigenen Auto als Transportmittel überzeugt.“. Konkreter zum autonomen Fahren (Autos und Transporträder) wurde abgefragt, welche Kosten und Nutzen es mit sich bringt und wie hoch die Akzeptabilität ist (z.B.: „Ich denke, dass autonomes Fahren die Mobilität in Deutschland verbessern würde.“). Im nächsten Teil wurde zunächst das Transport-Rufsystem des Projekts vorgestellt und anschließend das Mobilitätsverhalten der Befragten untersucht. Dabei sollte angegeben werden, welche Verkehrsmittel für welche Wege (z.B. zur Arbeit, zur Schule oder zu Freizeitaktivitäten) genutzt werden, und welche Bedürfnisse (z.B. Komfort, Kosten oder Flexibilität) eine entscheidende Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen. Im letzten Teil der Befragung wurde abgefragt unter welchen Bedingungen das Rufsystem genutzt werden würde und wie wahrscheinlich die tatsächliche Nutzung wäre. (z.B.: „Würden Sie den ÖPNV mehr nutzen, wenn das autonome Transportrad-Rufsystem in Magdeburg eingerichtet werden würde?“ oder „Wie häufig würden Sie das konventionelle Fahrradleihsystem im Vergleich zum autonomen Transportrad-Rufsystem nutzen?“). Zum Abschluss wurden weitere relevante Aspekte erfasst, die einen Einfluss auf die Einstellung zu autonomen Transporträdern haben können, wie z.B. allgemeine Technikakzeptabilität oder Einstellungen zur Digitalisierung, aber auch bisherige Berührungspunkte mit dem Projekt und Erfahrungen mit (autonomen) Transporträdern. Außerdem wurden einige Fragen zu Corona gestellt, um Veränderungen durch die Pandemie nachvollziehen zu können, z.B. Veränderungen des Mobilitätsverhaltens oder der Einstellung zur Digitalisierung („Welche Auswirkungen haben die neuesten digitalen Technologien Ihrer Meinung nach aktuell auf die Gesellschaft, die Wirtschaft und auf Ihre Lebensqualität?“).

Am Ende des Fragebogens wurden die Magdeburger Teilnehmerinnen noch über die ebenfalls in Magdeburg stattfindende Passantinnenstudie (TAP 3.5) informiert und konnten ihr Interesse an einer Teilnahme (und ihr

Einverständnis, dafür kontaktiert zu werden) hinterlegen. Dies nutzten die Probandinnen auch, so dass Langzeitanalysen möglich wurden.

AP 3.5 Akzeptanz Passantinnen/Verkehrsteilnehmerinnen

Dieses Arbeitspaket fokussierte darauf, wie Passantinnen und andere Verkehrsteilnehmerinnen optimal mit dem Aura-System interagieren und es annehmen würden. Dazu wurden 2020 zwei Studien durchgeführt, die in Form von virtual reality umgesetzt wurden. Dies war notwendig, um bereits Begegnungssituationen abbilden zu können, bevor ein reales Aura-Rad im Straßenverkehr angetroffen werden konnte, da es ja noch in Entwicklung war. Die Durchführung dieser Studien waren auch durch die Sicherstellung pandemiebedingter Hygienemaßnahmen ein aufwendiger und ressourcenintensiver Prozess. Die Studie für Passantinnen fand im Fraunhofer IFF Magdeburg statt. Hier wurde das virtuelle 360°-Labor „Elbedome“ genutzt, in dem die n = 115 Studienteilnehmerinnen auf eine virtuelle Version des autonomen Lastenrades trafen und mit diesem auf realen Straßenzügen Magdeburgs interagierten. Dabei wurden unterschiedliche Konstruktionsvarianten des autonomen Lastenrades getestet, etwa mit LEDs oder Displays oder mit/ohne einer Turmaufbaute. Nach der virtuellen Interaktion, die für die gesamte Zeit von Projektmitarbeiterinnen und Hilfswissenschaftlerinnen begleitet und durchgeführt wurden, wurden die Teilnehmerinnen mittels eines kurzen Fragebogens zu weiteren Aspekten befragt, die sich aus einer Auswahl relevanter Aspekte der Mobilitätsbedarfserhebung (TAP 3.4) deckten, um Vergleiche ziehen zu können. Alle Teilnehmerinnen der Passantinnenstudie hatten bereits an der Mobilitätsbedarfserhebung (TAP3.4) teilgenommen, so dass es sich hier um eine Längsschnitterhebung handelt. Das ermöglicht, Vergleiche zu ziehen, wie dieselben Personen zu einem früheren Zeitpunkt (TAP 3.4) und einem späteren Zeitpunkt (TAP 3.5) verschiedene Sachverhalte beurteilen, und ob sich signifikante Veränderungen, z.B. hinsichtlich der Einschätzung von Akzeptabilität der autonomen Lastenräder, ergeben. Auch diese Befragung wurde von Projektmitarbeiterinnen und Hilfswissenschaftlerinnen begleitet und durchgeführt. Die Teilnahme wurde mit einer Aufwandsentschädigung vergütet.

Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass das autonome Lastenrad unabhängig von Konstruktionsvarianten überwiegend als sicher, vertrauenswürdig, vorhersehbar in seiner Teilnahme am Straßenverkehr und hilfreich hinsichtlich seiner Signale (Klingeln, Lichtzeichen) empfunden wurde.

Die zweite Studie mit anderen Verkehrsteilnehmerinnen, d.h. Autofahrerinnen, wurde vom Fraunhofer ITWM in Kaiserslautern in deren Fahrsimulator durchgeführt. Hier trafen die vom Fraunhofer ITWM rekrutierten n = 127 Teilnehmerinnen als Autofahrerinnen virtuell auf das autonome Lastenrad. Auch hier wurden vom Projektteam vorher ausgewählte typische Verkehrsszenarien verwendet. Nach der Erhebung im Fahrsimulator beantworteten die Probandinnen ebenfalls einen kurzen Fragebogen analog zu der Erhebung mit Passantinnen. Auch in dieser Studie wurde das autonome Lastenrad unabhängig von Konstruktionsvarianten überwiegend als sicher, vertrauenswürdig, vorhersehbar in seiner Teilnahme am Straßenverkehr und hilfreich hinsichtlich seiner Signale (Klingeln, Lichtzeichen) empfunden. Die Ergebnisse wurden in das gesamte Projektteam zurückgegeben und diskutiert.

Im Jahr 2021 wurde die zweite Welle der umfangreichen Fragebogenstudie, die an die Mobilitätsbedarfserhebung (TAP 3.4) anschloss, mit leichter pandemiebedingter Verzögerung durchgeführt. Hierfür wurden gegen die Zahlung von Teilnahmeentschädigung die Stichprobe Magdeburger Teilnehmer*innen erneut kontaktiert (Rücklauf von n=294 Teilnehmer*innen). Zum Vergleich mit der deutschen Population wurde gemäß der Vergabe 30/20 erneut eine Vergleichsstichprobe (n = 300) über den Anbieter Respondi rekrutiert. Zur Durchführung und Verwaltung der Vergütung standen Hilfswissenschaftlerinnen zur Verfügung. Die anstehende, umfangreiche Datenanalyse durch die Projektmitarbeiterinnen wurde ebenso durch Hilfswissenschaftlerinnen unterstützt. Die Ergebnisse zeigen, dass das autonome Lastenrad überwiegend als akzeptabel eingeschätzt wird und eine Einführung als Mobilitätsangebot begrüßt wird.

Unterstützend wurde eine vertiefende Untersuchung zu einer spezifischen Fragestellung, die Trajektorienplanung betraf, im Herbst 2021 durchgeführt. Hierfür wurden Videoaufnahmen des Aura-Rades in unterschiedlichen Abbrems-, Anfahrt-, und Vorbeifahrtensituationen angefertigt und online einer Stichprobe von n = 86 Personen eingeschätzt. Die Ergebnisse zeigten auch hier eine hohe Akzeptabilität und ein hohes Sicherheitsempfinden gegenüber dem Aura-Rad.

Die Ergebnisse weiterer und tiefergehender Analysen wurden in Form von wissenschaftlichen Publikationen, die von den Projektmitarbeiterinnen in Unterstützung durch Hilfswissenschaftlerinnen angefertigt werden, veröffentlicht.

Im Rahmen des Projektes AuRa sind fünfzehn wissenschaftliche Publikationen entstanden:

Haj Salah, I.; Mukku, V.D.; Kania, M.; Assmann, T.; Zadek, H. (2022). Implications of the Relocation Type and Frequency for Shared Autonomous Bike Service: Comparison between the Inner and Complete City Scenarios for Magdeburg as a Case Study. Sustainability 2022, 14, 5798. <https://doi.org/10.3390/su14105798>.

- Haj Salah, I.; Mukku, V.D.; Kania, M.; Assmann, T. (2022). Could the next generation of bike-sharing with autonomous cargo bikes be financially sustainable? accepted
- Kania, M., Assmann T. (2022). Data-driven approach for defining demand scenarios for shared autonomous cargo-bike fleets. accepted
- R. Konradt, L. Junge, S. Sass and S. Schmidt, „Design of a spring-loaded brake for automated bikes“, II. Interdisciplinary Conference on Mechanics, Computers and Electrics (ICMECE 2022), October 2022. (in press)
- Mukku, V.D., Haj Salah, I., Roy, A., Assmann T. (2022). Evaluation of station distribution strategies for next-generation bike-sharing system. Accepted
- Sass, S., Höfer, M., Schmidt, M., & Schmidt, S. (2022). Shared autonomous cargo bike fleets – approaches for AI-based trajectory forecasts of road users. Artificial Intelligence in Transportation (RelStat-2022) CONFERENCE 2022
- Haj Salah, I., Dev Mukku, V., Schmidt, S., & Assmann, T. (2021). A Conceptual Model for the Simulation of the Next Generation Bike-Sharing System with Self-driving Cargo-Bikes. 5th Conference on Sustainable Urban Mobility (CSUM2020), 1, 253–262.
- Haj Salah, Imen; Mukku, Vasu Dev; Kania, Malte; Assmann, Tom (2021). Towards sustainable liveable city - management operations of shared autonomous cargo-bike fleets. Future transportation - Basel: MDPI, Bd. 1 (2021), 3, S. 505-532.
- Kastner, Karen; Gehlmann, Franziska; Salzer, Sigrid; Kastner, Ingo; Matthies, Ellen (2021). Determinants of the acceptability of autonomous (cargo) mobility. Transportation research interdisciplinary perspectives - Amsterdam: Elsevier Ltd., Bd. 11 (2021), insges. 9 S.
- Mukku, Vasu Dev; Salah, Imen Haj; Assmann, Tom (2021). Simulation testbed for the next-generation bike-sharing system with self-driving cargo-bikes. IFAC-PapersOnLine/ Internationale Förderung für Automatische Lenkung - Frankfurt: Elsevier, Bd. 54 (2021), 1, S. 1098-1103.
- Schmidt, Stephan; Assmann, Tom; Junge, Lars; Höfer, Markus; Kastner, Karen; Manoeva, Devina; Matthies, Ellen; Riestock, Maik; Rolof, Sebastian; Sass, Stefan; Schmidt, Michael; Seidel, Martin; Weißflog, Julia. (2021). Shared autonomous cargo bike fleets -approaches for a novel sustainable urban mobility solution.
- Haj Salah, I. (2020). Fleet management challenges of the next generation of bike-sharing system with autonomous cargo-bikes. *13th International Doctoral Student Workshop on Logistics*.
- Krause, K., Assmann, T., Schmidt, S. & Matthies, E. (2020). Autonomous driving cargo bikes – Introducing an acceptability-focused approach towards a new mobility offer. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100135.
- Assmann, T., Matthies, E., Gehlmann, F., & Schmidt, S. (2020). Shared autonomous cargo bike fleets – a better solution for future mobility than shared autonomous car fleets? *EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE 2020*.
- Devina Manoeva, Tom Assmann, Stephan Schmidt, "Ergonomic and functional analysis of an autonomous urban vehicle for individual use," in FDIBA Conference Proceedings, vol. 3, Nov. 2019, pp. 3-6.

1.3 Reduzierung der CO₂-Emissionen

Im Rahmen der Modellierung der CO₂-Emissionen wurde avisiert, dass bei einer flächendeckenden Einführung des AuRa-Mobilitätssystems eine jährliche Einsparung von 2.300 t CO₂ in Magdeburg bzw. 94.000t CO₂ Deutschlandweit möglich sind. Die Schätzungen konnten durch die Arbeiten im Rahmen des Projektes bestätigt werden, so ist beispielsweise davon auszugehen, dass jede durch ein autonomes Mikromobil substituierte

PKW-Fahrt zu einer Einsparung von ca. 90% der Emissionen pro Fahrt führen kann. Die flächendeckende Einführung des Systems war allerdings nicht Ziel des Projektes AuRa, so dass der experimentelle Nachweis dieser Abschätzung nicht erbracht werden kann. Aktuell stehen zudem rechtliche und regulatorische Hemmnisse einem produktiven Einsatz des Systems entgegen.

Die im Projekt AuRa erzielten technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse bilden allerdings die Basis für die technologische Weiterentwicklung des Systems sowie dessen Übertragung auf alternative Mikromobile. Des Weiteren sind aus dem Projekt AuRa weitere Projektideen entstanden, die den Automatisierungsgrad reduzieren sowie das Mobilitäts- auf ein LogistikszENARIO übertragen und damit ein weiteres Anwendungsfeld mit erheblichem Potential zur CO₂ Reduktion öffnen. Diese Projekte werden aktuell von der Universität Magdeburg mit weiteren Forschungs- und Entwicklungspartnern bearbeitet.

2 Nutzung und Einführung

Das AuRa-System besteht im Wesentlichen aus den verschiedenen Entitäten des autonomen Lastenrades. Eine flächendeckende Einführung des Systems stand nicht im Fokus des Projektes, da im Wesentlichen ein Proof-of-Concept erbracht werden sollte. Dieser dient als Grundlage für die weitere Entwicklung des Systems. Ein späteres Marktsystem muss zudem über ein übergeordnetes Leit- und Steuersystem verfügen, welches das Verkehrssystem orchestriert und die Schnittstelle zu einem bestehen Verkehrsleitsystem herstellt. Im Detail müssen auf technischer, betriebs- und sozialwissenschaftlicher sowie rechtlicher Ebene noch folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Leitstelle
- Teststrecken
- Diebstahlschutz
- Robustheit und Zuverlässigkeit der technischen Funktion
- Zulassungsfähigkeit und Sicherheit

Es ist geplant, die im Rahmen des Projektes AuRa angeschafften Versuchsträger und wissenschaftlichen Geräte einer weiteren Nutzung im wissenschaftlichen, nicht-wirtschaftlichen Bereich zuzuführen.

3 Meilensteine und Finanzierungsplan

3.1 Meilensteine

Abb. 5 zeigt den Zeit- und Arbeitsplan für das Verbundprojekt „AuRa“ auf der Ebene der Teilprojekte und Hauptarbeitspakete. Die Zugehörigen Meilensteine sind in Tabelle 2 aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete kann den Sachberichten aus 2019, 2020, 2021 und 2022 entnommen werden.

Tabelle 2: Meilensteinplan

Nr.	Bezeichnung des Meilensteins	Abbruchkriterien	Projektmonat	Status
M1	Systemspezifikation	Die Rahmenbedingungen der Szenarien „Innenstadt Magdeburg“ und „Elbradweg“ referenzieren Aspekte, die durch das Gesamtkonzept nicht abgebildet werden können.	5	abgeschlossen
M2	Aufbau P0 abgeschlossen	Der Aufbau des Sensorträgers erweist sich im Hinblick auf die sensorischen oder aktorischen Fähigkeiten nicht als geeignet die Messfahrten zu realisieren, bzw. erste Akzeptanzstudien durchzuführen.	10	abgeschlossen
M3	Aufbau P1 abgeschlossen	Im Zusammenspiel der Konfiguration des Prototypen P1 mit ersten Versuchen wird deutlich, dass das Betriebskonzept ungeeignet oder die Akzeptanz so gering ausfällt, dass eine Implementierung keine Aussicht auf Anwendung hat.	19	abgeschlossen
M4	Aufbau P2 abgeschlossen	Die Integration der Komponenten in die Gesamtapplikation scheitert, für die Einsatzfähigkeit zentrale Elemente können nicht genutzt werden.	27	abgeschlossen
M5	Evaluation im Feld	Erprobung konnte nicht erfolgreich abgeschlossen werden	36	abgeschlossen

3.2 Ausgaben und Finanzierungsplan

Der Ausgaben und Finanzierungsplan orientiert sich am Zuweisungsschreiben vom 14.05.2019 sowie den Änderungsschreiben vom 12.12.2019, 27.02.2020, 17.03.2021, 06.09.2021, 03.03.2022 und dem 6. Änderungsschreiben gem. Änderungsantrag vom 31.08.2022.

Abbildung 3 zeigt die geplanten Ausgaben zum Projekt „AuRa“ von 2019 bis 2022.

Anlage V3: Ausgaben- und Finanzierungsplan der OVGU im Projekt AuRa					
	2019	2020	2021	2022	Gesamt
Gesamtausgaben Genehmigt 4.ÄS					
A) Personalausgaben					
Wissenschaftler/innen + HiWi	192.102	773.605	995.339	871.382	2.832.428
Summe A	192.102	773.605	995.339	871.382	2.832.428
B) Sächliche					
	7.337	421.253	298.647	214.900	942.137
					0
Summe B	7.337	421.253	298.647	214.900	942.137
C) Geräte- und Investitionsausgaben					
Geräteausgaben					
Investitionen	55.293	191.000	327.676	84.421	658.390
Sonstiges					
Summe C	55.293	191.000	327.676	84.421	658.390
Gesamtfinanzierung	2019	2020	2021	2022	Gesamt
Gesamtausgaben (Summe A-	254.732	1.385.858	1.621.662	1.170.703	4.432.955
davon zuweisungsfähige					
Ausgaben	254.732	1.385.858	1.621.662	1.170.703	4.432.955
zu erwartende					0
Summe der zuweisungsfähigen					
Ausgaben	254.732	1.385.858	1.621.662	1.170.703	4.432.955
Vorgesehene Finanzierung					
a) Zuweisungen aus EFRE	254.732	1.385.858	1.621.662	1.170.703	4.432.955
b) Beiträge Dritter	0	0	0	0	0
c) Eigenmittel des	0	0	0	0	0
Investitionsrate(n) des					
ordentlichen Haushalts					0
Entnahme aus Rücklagen					0
Kredite					0
Finanzierungshilfen von					0
zur Verstärkung der					
Eigenmittel					0
Summe der Mittel	254.732	1.385.858	1.621.662	1.170.703	4.432.955

Abbildung 3: Übersicht Finanzierungsplan des Projektes „AuRa“