Individueller Schlussbericht Unikai

AKIDU

Automatische, durch KI-integrierte Disposition für Universalterminals - Digitalisierung manueller Prozesse bei Empfang, Lagerung und Verladung heterogener, nicht standardisierter rollender Güter

FKZ 19H22002A

22.12.2025, v.2.0

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

AKIDU: Automatische, durch KI-integrierte Disposition für Universalterminals - Digitalisierung manueller Prozesse bei Empfang, Lagerung und Verladung heterogener, nicht standardisierter rollender Güter

Individueller Schlussbericht

Unikai Lagerei- und Speditionsgesellschaft mbH

Ansprechpartner: Melanie Dins

Dessauer Straße 10, 20457 Hamburg
Telefon: 040 72002 420
Email: dins@unikai.eu

IHATEC Innovative Hafentechnologien

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

Teil I 4

1 Aufgabenstellung 4

2 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens 4

3 Planung und Ablauf der Arbeiten 5

4 Wissenschaftlich-technischer Stand 6

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7

Teil II **7**

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 7

1.1 AP 100: Anforderungsanalyse und Konzeptentwicklung 8

1.2 AP 200: KI-basierte Vermessung und Verwiegung 10

1.3 Ergebnisse AP 300: KI-basiertes System für die Identifikation und Ortung von Gütern 10

1.3.1 RFID-basierte Ansätze 10

1.3.2 Optische Marker 11

1.3.3 GPS-Lokalisierung über Drohnen 11

1.4 Ergebnisse AP 400: Zentrales Datenverwaltungssystem 11

1.5 Ergebnisse AP 500: Anwendungen für den Betrieb 12

1.6 Ergebnisse AP 600 / AP 700: Regelbasierte Platzplanung und Stellplatzverwaltung 12

1.7 AP 800 Implementierung der regelbasierten Platzplanung und Stellplatzverwaltung 12

1.8 Ergebnisse AP 900: Evaluation und Validierung 14

1.8.1 Teilvalidierung der Vermessungsstation 14

1.8.2 Evaluation der Identifikations- und Lokalisierungsverfahren 14

1.8.3 Validierung der regelbasierten Platzplanung und Stellplatzverwaltung 14

1.8.4 Gesamtbewertung 15

1.9 AP 1000: Projektsteuerung, Koordination und Öffentlichkeitsarbeit 15

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 15

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 16

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 17

5 Fortschritte bei anderen Stellen 19

6 Veröffentlichungen 19

7 Quantitative und Qualitative Effekte von AKIDU 20

7.1 Organisatorische und prozessuale Effekte 20

7.2 Technische und operative Effekte 20

7.3 Nutzen für die deutsche Hafenwirtschaft 21

7.4 Nutzen für Umwelt und Allgemeinheit 21

7.5 Aufwand im Verhältnis zum Nutzen 22

Teil I

1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben AKIDU (Automatische, durch KI-integrierte Disposition für Universalterminals) adressiert die durchgängige Digitalisierung und KI-gestützte Automatisierung zentraler Prozesse auf einem Universal-/RoRo-Terminal (Unikai). Es fokussiert zwei Hauptbereiche:

- Automatisierte, KI-integrierte Vermessung, Verwiegung und Zustands-/Schadenerfassung für heterogene, nicht standardisierte rollende Güter (RoRo/High&Heavy/Projektladung).
- KI-gestützte Identifikation, flexible Platzplanung und regelbasierte Stellplatzvergabe mit Kopplung an ein zentrales Daten-/Modell-Repository sowie apc/CHESSCON zur operativen Entscheidungsunterstützung.

Die Unikai Lagerei- und Speditionsgesellschaft mbH nahm im Verbundprojekt AKIDU die Rolle des zentralen Praxispartners ein, dessen operative Realität die Grundlage für die Entwicklung und Erprobung KI-gestützter Verfahren bildete. Ziel des Teilvorhabens war es, die bislang weitgehend manuellen und papierbasierten Prozesse des Umschlags heterogener rollender Güter – insbesondere Vermessung, Verwiegung, Identifikation, Schadenerfassung sowie Stellplatzvergabe – durch Digitalisierung und den gezielten Einsatz künstlicher Intelligenz grundlegend zu modernisieren. Unikai stellte für die Projektpartner nicht nur das reale Testfeld, sondern auch das notwendige prozessuale und fachliche Wissen bereit und war verantwortlich für die kontinuierliche Validierung der technologischen Entwicklungen unter echten Terminalbedingungen.

Der Fokus lag dabei auf der Einführung einer automatisierten Vermessung und Verwiegung, der Entwicklung KI-basierter Klassifikations- und Erkennungsverfahren für Fahrzeuge und Projektladung sowie auf der Schaffung einer digitalen Grundlage für eine regelbasierte Stellplatz- und Flächenplanung. Diese Aufgabenstellung ergab sich aus der operativen Herausforderung, dass im Bereich der RoRo- und High-and-Heavy-Umschläge bis heute kaum durchgängig digitale Prozessketten existieren, während die Komplexität der Güter, die knappen Flächenkapazitäten und die hohen Umschlagsdynamiken eine präzise und zuverlässige Datenlage zwingend erforderlich machen. Mit AKIDU sollte ein technologischer Sprung erzielt werden, der unmittelbar auf die Wettbewerbsfähigkeit des Universalterminals wirkt.

2 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens

Zu Beginn des Projekts waren die Prozesse am Terminal von Unikai durch eine Vielzahl manueller Tätigkeiten geprägt. Die Vermessung von Fahrzeugen und Stückgut erfolgte bislang vollständig händisch, was neben hohem Zeitaufwand auch erhebliche Messungenauigkeiten mit sich brachte. Die Identifikation der Güter basierte auf physischen Papierschildern, die bei Witterungseinflüssen beschädigt oder unleserlich werden konnten und im laufenden Betrieb häufig verloren gingen. Die Stellplatzvergabe folgte einer erfahrungsbasierten, aber nur begrenzt systematisierbaren Praxis, die weder die historische Datenlage noch die prognostizierten Güterströme in konsistenter Weise berücksichtigen konnte.

Damit ein solches Projekt erfolgreich durchgeführt werden konnte, musste Unikai umfangreiche infrastrukturelle Voraussetzungen schaffen. Hierzu gehörten die Bereitstellung geeigneter Flächen für den Aufbau einer Vermessungsstation ebenso wie die Vorbereitung eines abgesicherten Testumfelds, das sowohl stationäre Kamerainstallationen als auch flexible Drohneneinsätze ermöglichen konnte. Der ursprünglich vorgesehene Standort im Gate-Bereich erwies sich aufgrund baulicher Beschränkungen als ungeeignet, sodass zunächst eine Lagerhalle zur Testumgebung umfunktioniert und später infolge von Terminalumbauten eine erneute Verlagerung notwendig wurde.

Neben der Infrastruktur musste Unikai auch eine Vielzahl an Testfahrzeugen und Gütern bereitstellen, um die unterschiedlichen Ladungskategorien realitätsnah abdecken zu können. Dies betraf Neufahrzeuge, Gebrauchtfahrzeuge, LKW unterschiedlicher Baureihen, Trailer, Mafi-Einheiten und Projektladung mit sehr variierenden Geometrien und Strukturen. Erst durch die kontinuierliche Bereitstellung solcher Güter war es dem wissenschaftlichen Forschungspartner HITeC möglich, die KI-Modelle und Sensorkonfigurationen zu trainieren, zu testen und zu optimieren.

Eine wesentliche Voraussetzung war darüber hinaus die technische Integration in die IT-Umgebung von Unikai. Für die Verarbeitung und den Austausch von Vermessungsdaten mussten Systemzugänge, Datenextrakte, Netzwerkverbindungen und Schnittstellen (u. a. REST-Endpunkte) geschaffen werden. Parallel hierzu wurde ein Server bereitgestellt, der sowohl Trainingsdaten als auch Ausführungsmodelle beherbergen sollte. Die Bereitstellung dieser technischen Infrastruktur erfolgte unter der Bedingung, den operativen Terminalbetrieb nicht zu beeinträchtigen, was eine präzise Koordination zwischen Projektteam und operativen Bereichen erforderte.

3 Planung und Ablauf der Arbeiten

Der Ablauf des Projekts gliederte sich aus Unikai-Sicht in vier aufeinander aufbauende Phasen, die im Verlauf der Projektlaufzeit immer wieder angepasst werden mussten, da technische Erkenntnisse, infrastrukturelle Veränderungen und neue Anforderungen ein iteratives Vorgehen notwendig machten.

Die erste Phase konzentrierte sich auf eine umfassende Aufnahme und Analyse der bestehenden Prozesse entlang der gesamten logistischen Kette. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Unikai dokumentierten detailliert alle relevanten Abläufe – von der Anlieferung über Gate-Prozesse, Vermessung, Identifikation, Sonderdienstleistungen, Lagerlogik bis hin zur Vorbereitung der Schiffsverladung. Durch Befragungen, Selbstaufschreibungen und Prozessbeobachtungen entstand ein präzises Bild der operativen Realität. Diese Phase machte deutlich, dass die vorhandene Datenqualität in wesentlichen Bereichen unzureichend war, insbesondere in Bezug auf Maße, Gewichte und geometrische Besonderheiten der Güter. Die Erfassung erfolgte dezentral, papiergestützt und nur teilweise digitalisiert; daraus resultierten Inkonsistenzen, die eine automatisierte Weiterverarbeitung erheblich erschwerten.

Die zweite Phase war von der Entwicklung und dem physischen Aufbau der Vermessungsstation geprägt. Diese Aufgabe zeigte sich komplexer als in der ursprünglichen Projektplanung angenommen. Die Platzierung der Kameras erforderte erhebliche bauliche Maßnahmen, da für

eine konsistente 3D-Vermessung Mindestabstände, Höhen und Blickwinkel einzuhalten waren. Die extrinsische Kalibrierung der Sensoren erwies sich als wissenschaftlich wie praktisch herausfordernd, da bereits kleine Abweichungen in der Kameraposition zu signifikanten Verzerrungen in der Punktwolke führten. Unikai unterstützte diesen Prozess intensiv durch die Bereitstellung geeigneter Kalibrierungstargets, durch die wiederholte Ausrichtung der Sensoren sowie durch zahlreiche praktische Testläufe mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen.

Die dritte Phase umfasste die Entwicklung und Erprobung eines Identifikations- und Lokalisierungssystems. Unikai testete im realen Betrieb verschiedene Markerarten und deren Anbringung an unterschiedlichen Güterprofilen. Während RFID-basierte Ansätze insbesondere bei dicht gestellten LKW aufgrund metallischer Abschirmung an Grenzen stießen, zeigten optische Datamatrixmarker in Kombination mit Drohnenaufnahmen ein hohes Potenzial. Diese Tests ermöglichten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Lesbarkeit, Witterungsanfälligkeit, benötigter Markergröße und optimaler Platzierung am Fahrzeug. Parallel dazu wurden erste Drohnenflüge durchgeführt, bei denen die Lokalisierung von Gütern durch die Kombination aus optischer Markerkennung und GPS-Positionierung untersucht wurde.

Die vierte Projektphase fokussierte auf die Entwicklung einer regelbasierten Platz- und Stellplatzplanung. Unikai steuerte hierzu das notwendige Erfahrungswissen über Flächencharakteristika, betriebliche Priorisierungskriterien, Abhängigkeiten von Schiffsrotationen und operative Besonderheiten bei. Gemeinsam mit akquinet wurden verschiedene Flächentypen definiert und die relevanten Einflussfaktoren – von Ladungsart über Standzeiten bis hin zu Wechselwirkungen zwischen Import- und Exportgütern – systematisch herausgearbeitet. In iterativen Schleifen wurden diese Anforderungen in ein Datenmodell und ein funktionales Konzept überführt und anschließend in prototypischen Anwendungen getestet.

4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Der wissenschaftlich-technische Ausgangsstand war durch den Umstand geprägt, dass im Bereich automatisierter Vermessung und Prozessdigitalisierung für RoRo- und High-and-Heavy-Ladung bislang nur wenige praxistaugliche Lösungen existierten. Während containerisierte Umschlagsprozesse bereits auf hoch automatisierte Systeme zurückgreifen, mangelte es in diesem Segment an skalierbaren Werkzeugen und etablierten Standards. Die Kombination aus großen, heterogenen Gütern, oft komplexen geometrischen Strukturen und stark schwankenden Umgebungsbedingungen stellt eine besondere Herausforderung dar.

Sensorikbasierte Verfahren, insbesondere Kamerasysteme auf TOF- oder LiDAR-Basis, hatten sich zwar in Laborumgebungen bewährt, jedoch war deren Einsatz in einer realen Terminalumgebung bis dato kaum untersucht. Reflexionen an glänzenden Oberflächen, Verschmutzungen, Witterungseinflüsse und unkontrollierte Lichtbedingungen führten zu erheblichen Störungen der Messdaten, die erst durch aufwendige Filterverfahren und geeignete KI-gestützte Nachbearbeitung kompensiert werden konnten.

Auch im Bereich der Identifikation war die Ausgangslage heterogen. RFID-Technologie konnte unter bestimmten Bedingungen gute Ergebnisse liefern, war jedoch insbesondere bei dicht stehenden oder großflächigen metallischen Objekten störanfällig. Optische Marker erwiesen sich hingegen als vielversprechend, erforderten jedoch hoch präzise Erkennungsmethoden und

geeignete Hilfsmittel zur Lokalisierung. Die gleichzeitige Nutzung von Drohnen fügte eine zusätzliche Komplexität hinzu, bot jedoch großes Potenzial für eine zukünftige flächendeckende Erfassung von Bestandsdaten.

Im Bereich der Stellplatzplanung zeigte sich, dass bislang weltweit kaum regelbasierte Planungsmodelle für heterogene Güter existierten. Die Analyse der operativen Realität von Unikai machte deutlich, dass existierende Softwarelösungen hauptsächlich auf containerisierte Güter ausgelegt sind und daher erhebliche Anpassungen notwendig waren, um die Vielfalt der Ladungen abbilden zu können.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit zwischen Unikai, HITeC und akquinet war während der gesamten Projektlaufzeit von hoher Intensität und gegenseitigem Austausch geprägt. Als Praxispartner lieferte Unikai die operativen Anforderungen, stellte Testflächen, Fahrzeuge, Daten und Personal bereit und begleitete die Forschungsarbeiten kontinuierlich durch Erfahrungswissen, praktische Validierung und kritische Rückmeldungen.

Mit HITeC bestand eine enge Kooperation im Bereich Sensorik, KI-Entwicklung und Bildverarbeitung. Die Forschungspartner führten Laboruntersuchungen durch, entwickelten Klassifikationsmodelle, optimierten die Punktwolkenverarbeitung und arbeiteten eng mit Unikai an der Installation und Kalibrierung der Vermessungsstation. HITeC war maßgeblich für die wissenschaftlich-technische Umsetzung der Vermessungs- und Identifikationssysteme verantwortlich, während Unikai die realweltlichen Rahmenbedingungen sicherstellte.

Mit akquinet arbeitete Unikai besonders im Bereich der Prozessdigitalisierung und Stellplatzplanung zusammen. Basierend auf realen Terminaldaten entwickelte akquinet das funktionale Konzept für ein regelbasiertes Stellplatzsystem, welches die operative Entscheidungsfindung unterstützen soll. Unikai validierte die Konzepte in Bezug auf ihre Anwendbarkeit, überprüfte deren Kompatibilität mit bestehenden Abläufen und lieferte praxisrelevante Anforderungen, die häufig in weiteren Iterationen berücksichtigt werden mussten.

Darüber hinaus bestand eine enge Zusammenarbeit mit technischen Dienstleistern wie Sprind, Bittermann und IPS Marzinzik, die maßgeblich zur erfolgreichen Bereitstellung der technischen Infrastruktur beitrugen. Die Koordination des Projekts erfolgte regelmäßig in gemeinsamen Abstimmungen, Workshops und Testterminen, sodass Erkenntnisse aus Forschung und operativer Praxis laufend miteinander verzahnt werden konnten.

Teil II

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts eingesetzten Fördermittel wurden von Unikai zielgerichtet für die Erprobung, Validierung und praktische Umsetzung der im Forschungsverbund entwickelten

Technologien genutzt. Sie dienten der Realisierung einer hochgradig realitätsnahen Testumgebung sowie der operativen Begleitung sämtlicher technologischer Arbeitspakete. Die Mittel ermöglichten sowohl infrastrukturelle Maßnahmen als auch umfangreiche praktische Beiträge, ohne die eine Anwendung unter realen Terminalbedingungen nicht erreichbar gewesen wäre.

1.1 AP 100: Anforderungsanalyse und Konzeptentwicklung

Das Arbeitspaket AP100 bildete das Fundament des gesamten AKIDU-Projekts und war von zentraler Bedeutung für den späteren Projektverlauf. Unikai erstellte in diesem Arbeitspaket die umfassende systematische Analyse der bestehenden Terminalprozesse im Bereich Vermessung, Verwiegung, Identifikation, Lager- und Stellplatzvergabe sowie Sonderdienstleistungen. Ziel war es, die operative Realität vollständig zu erfassen, bestehende Probleme und Ineffizienzen sichtbar zu machen und daraus belastbare Anforderungen für die späteren KI-basierten Systeme abzuleiten.

Unkai übernahm in diesem AP die Hauptrolle, während HITeC methodisch unterstützte und akquinet die Analyseergebnisse später in Modelle und Softwarekonzepte überführte.

Detaillierte Prozessaufnahme

Zu Beginn wurden sämtliche relevanten Prozesse entlang der logistischen Kette — Anfahrt, Gate-Prozesse, Vermessung und Verwiegung, Identifikation, Schadenserfassung, Flächenplanung, interne Umfuhren, Vorbereitung der Schiffsbeladung — vollständig dokumentiert. Die Aufnahme erfolgte mithilfe:

- direkter Prozessbeobachtungen,
- strukturierter Interviews mit operativem Personal,
- Selbstaufschreibungen einzelner Mitarbeitender,
- Analyse historischer Bewegungs- und Stammdaten,
- Sichtung vorhandener IT-Systeme (Consens, eShip, lokale Tools).

Wesentliche Schritte erfolgen heute mediengebrochen, manuell, inkonsistent und teilweise ohne systemische Unterstützung. Es zeigte sich, dass die Datenqualität — insbesondere Maße, Schäden, Identität der Güter — stark variierte und häufig erst spät oder unvollständig im TOS erfasst wurde.

Die Transparenz, die die Analyse herstellte, erlaubte eine systematische Bewertung der Potenziale für Automatisierung und KI.

Analyse der Vermessung und Verwiegung

Ein Schwerpunkt von AP100 war die Analyse der Vermessungs- und Verwiegungsprozesse, da diese später die Grundlage für AP200 bilden sollten.

Die Prozessaufnahme verdeutlichte, dass

- Vermessungen derzeit vollständig manuell mit Maßband oder Radmaßstab erfolgen.
- Messfehler von 5–20 cm in der Praxis häufig sind, besonders bei LKW, Projektladung und Fahrzeugen mit Anbauten.

- Die Messungen teilweise auf Papier notiert und später übertragen werden — mit hoher Fehleranfälligkeit.
- Fotos von Schäden oder Aufbauvarianten oft nicht vollständig erstellt werden können, insbesondere bei hohen Fahrzeugen oder kombinierten Aufbauten (z. B. PKW auf LKW).

Diese Erkenntnisse bestätigten die Notwendigkeit einer sensorbasierten Lösung und flossen direkt in die Konzeption der Vermessungsstation ein.

Analyse der Identifikationsprozesse

Auch die Identifikation wurde im Rahmen von AP100 detailliert untersucht. Es kommen ausschließlich Papierschilder zum Einsatz, deren Hauptprobleme wie folgt beschrieben werden können:

- sie sind witterungsanfällig,
- können verloren gehen,
- sind häufig unvollständig oder unlesbar ausgefüllt,
- erschweren eine spätere Lokalisierung und Rückverfolgbarkeit.

Diese Defizite führten zu der Entscheidung, im Projekt alternative Identifikationsmethoden wie RFID und Datamatrixmarker zu prüfen und perspektivisch in AP300 einzusetzen.

Erfassung der Flächen- und Stellplatzlogik

Ein weiterer Kernpunkt von AP100 war die systematische Analyse der Flächenvergabe. Unikai zeigte auf, dass die Stellplatzvergabe heute stark auf Erfahrungswissen basiert und kaum formalisiert ist. Operative Mitarbeitende berücksichtigen zahlreiche Faktoren gleichzeitig, etwa:

- Schiffspläne und Ladefenster,
- vorhergesagte Ladungsströme,
- Flächenbelegungen im Tagesverlauf,
- Restriktionen für Projektladung, Gefahrgut oder Übergrößen,
- Umfuhrrisiken,
- operative Engpässe und laufende Terminalumbauten.

Diese Faktoren mussten im Projekt strukturiert, kategorisiert und in Entscheidungslogiken überführt werden — ein wesentlicher Schritt für die späteren AP600, AP700 und AP800.

Ableitung technischer Anforderungen

Auf Grundlage der Prozessanalyse erstellte Unikai in AP100 einen umfangreichen Anforderungskatalog, der u. a. folgende Bereiche umfasste:

- Anforderungen an die Vermessungsstation (Höhen, Sensorik, Messfeld, Stabilität, Lichtbedingungen),
- Anforderungen an Identifikationsmarker, Drohnenflüge und Erkennungslogiken,
- Anforderungen an Datenstrukturen, Stammdaten, TOS-Anbindung, Schnittstellen,
- Anforderungen an das Datenmodell für Flächen- und Stellplatzverwaltung,
- Anforderungen an Benutzeroberflächen für operative Mitarbeitende.

Dieser Katalog bildete eine verbindliche Grundlage für alle technischen Arbeitspakete.

AP100 gilt aus Sicht Unikais als vollständig erfüllt und als kritisch essentiell für den Erfolg der nachfolgenden technologischen Arbeitspakete.

1.2 AP 200: KI-basierte Vermessung und Verwiegung

Die Entwicklung eines automatisierten Vermessungssystems stellte sich als eines der technisch komplexesten Vorhaben im Projekt heraus. Unikai war maßgeblich an dessen Planung, Aufbau und fortlaufender Optimierung beteiligt. Die Fördermittel ermöglichten die Bereitstellung baulicher Strukturen, Netzwerk- und Stromanschlüsse, Montagepunkte sowie die notwendige Sensorik, um 18 später 26 TOF-Sensoren zu installieren. Zur Dokumentation der Zustände bei der Annahme der Fahrzeuge wurden 8 RGB – Kameras eingesetzt, die die Fahrzeuge während der Vermessung von allen Seiten fotografieren. Diese Bilder werden an das TOS gesandt und dort mit den Fahrzeugdaten verknüpft.

Die Arbeiten zeigten, dass die automatisierte Vermessung heterogener Güter – insbesondere Gebrauchtfahrzeuge und LKW – unter Hafenbedingungen erheblich anspruchsvoller ist als in der Theorie. Reflektierende Oberflächen, inhomogene Fahrzeugstrukturen und wechselnde Lichtverhältnisse führten zu Störungen, die von HITeC in enger Abstimmung mit Unikai algorithmisch kompensiert werden mussten. Unikai brachte dazu umfangreiche Praxiserfahrungen ein, insbesondere in Bezug auf Messanforderungen für Schiffsbeladung, staukritische Maße (beispielsweise die Höhe von 1,60 m bei RoRo-Decks), sowie Umstände, unter denen Messungen manuell korrigiert werden müssen.

Parallel begleitete Unikai sämtliche Kalibrierungsschritte. Die extrinsische Kalibrierung, welche die Punktwolken mehrerer Kameras zusammenführt, erwies sich als besonders herausfordernd. Hier zeigte sich, wie wichtig reale Messumgebungen für die Forschung sind: Die Erkenntnisse über kalibrierungsrelevante Fehlerquellen – etwa Bewegungen durch Wind, minimale Ausrichtungsfehler oder unvorhersehbare Reflexionen – hätten in Laborumgebungen nicht gewonnen werden können.

Die Ergebnisse führten dazu, dass ein praxistauglicher Prototyp entwickelt werden konnte, der erstmals eine weitgehend automatisierte geometrische Erfassung von Fahrzeugen in einem RoRo-Terminal simuliert. Auch wenn eine vollständige operative Einführung noch weiteren Entwicklungsaufwand erfordert, zeigt das Projekt, dass der Einsatz kostengünstiger TOF-Sensoren prinzipiell geeignet ist, eine manuelle Vermessung langfristig zu ersetzen.

1.3 Ergebnisse AP 300: KI-basiertes System für die Identifikation und Ortung von Gütern

Ein entscheidender Engpass des heutigen Terminalbetriebs liegt in der Identifikation von Gütern. Unikai setzt bislang ausschließlich auf Papierschilder, die witterungsanfällig sind und regelmäßig verloren gehen. Die Fördermittel ermöglichten es, verschiedene Identifikationsmethoden in einer realen Umgebung zu testen.

1.3.1 RFID-basierte Ansätze

Passive RFID-Tags zeigten in frühen Tests vielversprechende Ergebnisse insbesondere bei Mafi-Trailern, die über große, flache Metallflächen verfügen, auf denen die Tags gut lesbar waren. Bei Gebrauchtfahrzeugen und insbesondere bei dicht aneinandergestellten LKW erwiesen sich

RFID-Tags jedoch als ungeeignet. Durch die starke Dämpfung der Funkwellen an Metalloberflächen und die unkontrollierte Reichweite kam es häufig zu Mehrfacherkennungen oder gar vollständigem Ausfall der Identifikation.

Unikai bewertete den operativen Nutzen dieser Technologie daher kritisch. Für den Einsatz im eigentlichen RoRo-Bereich wäre RFID nicht zuverlässig genug, um eine automatische Stellplatzzuordnung zu ermöglichen.

1.3.2 Optische Marker

Optische Datamatrixmarker erwiesen sich als wesentlich robuster. Unikai testete unterschiedliche Markergrößen, Materialien und Anbringungspositionen (Frontscheibe, Seitenscheiben, Stoßfänger). Die Forschung zeigte, dass Marker insbesondere bei Fahrzeugen mit klaren, kontrastreichen Flächen zuverlässig erkennbar sind. Größere Herausforderungen ergaben sich bei Fahrzeugen mit steilen Scheibenwinkeln oder sehr dunklen, reflektierenden Oberflächen.

In Kombination mit Drohnenaufnahmen konnte ein Großteil der Güter eindeutig identifiziert werden. Die experimentell ermittelte optimale Flughöhe von 7–9 Metern führte zu einem guten Kompromiss zwischen Sichtfeld, Erkennungswahrscheinlichkeit und GPS-Genauigkeit.

1.3.3 GPS-Lokalisierung über Drohnen

Die GPS-Positionierung in Drohnenbildern stellte ein wichtiges Element für die spätere Stellplatzzuordnung dar. Zwar war die Position eines Fahrzeugs nicht millimetergenau bestimmbar, doch die Kombination aus Markerposition, Bildauswertung und semantischer Flächenklassifikation ermöglichte eine präzise Lokalisierung innerhalb eines Stellplatzrasters. Unikai validierte diese Verfahren, indem real positionierte Fahrzeuge mit den im Modell ermittelten Koordinaten verglichen wurden.

1.4 Ergebnisse AP 400: Zentrales Datenverwaltungssystem

Unikai war in AP400 vor allem dafür verantwortlich, die Integration der Messergebnisse, KI-Modelle und Identifikationsinformationen in die vorhandene Systemlandschaft (Consens / eShip) vorzubereiten. Durch den Aufbau eines zentralen Datenverwaltungssystems wurde eine Grundlage geschaffen, um künftig:

- Vermessungsdaten
- 3D-Punktwolken
- KI-Modelle
- Annotationen
- Identifikations- und Lokalisierungsergebnisse

in einer einheitlichen Architektur abzulegen.

Unikai definierte Anforderungen an Datenschnittstellen, Datenvolumina, Latenzanforderungen und Sicherheitsaspekte. Die Middleware wurde so gestaltet, dass Daten in Echtzeit oder nahezu Echtzeit an ein Stellplatzverwaltungssystem übertragen werden können. Diese Integration stellt einen wesentlichen Schritt dar, um langfristig einen vollständig digitalisierten Güterfluss zu ermöglichen.

1.5 Ergebnisse AP 500: Anwendungen für den Betrieb

Unikai testete erste Benutzeroberflächen, die von HITeC für Vermessung und Identifikation entwickelt wurden. Die Applikation ermöglicht:

- die Erfassung und Darstellung von Punktwolken
- manuelle Korrekturen der gemessenen Dimensionen
- Anzeige von Annotationen und Fahrzeugmerkmalen
- Integration der HAM-Nummer
- Weiterleitung der Daten per REST-Schnittstelle an Unikai-Systeme

Die Mitarbeitenden bewerteten die Oberflächen positiv, betonten jedoch den Bedarf an klaren Benutzerführungen, reduzierter Komplexität und integrierter Fehlerbehandlung.

1.6 Ergebnisse AP 600 / AP 700: Regelbasierte Platzplanung und Stellplatzverwaltung

Die Förderung ermöglichte die Entwicklung eines daten- und regelbasierten Stellplatzplanungssystems, dass sich fundamental vom heutigen, erfahrungsgetriebenen Prozess unterscheidet. Unikai definierte in enger Abstimmung mit akquinet sämtliche Flächenarten des Terminals, einschließlich spezifischer Restriktionen wie:

- Flächen, die nur für bestimmte Gütergruppen geeignet sind
- operative Zonen für schnelle Abwicklung
- schiffskritische Warteflächen
- Flächen, die temporär aufgrund von Projekten oder Bauarbeiten entfallen
- Mischflächen mit variabler Nutzung

Die Forschung zeigte, dass eine algorithmische Planung nicht nur möglich, sondern unter bestimmten Voraussetzungen sogar präziser sein kann als menschliche Erfahrungslogik. Das entwickelte Modell erlaubt Simulationen zukünftiger Güterströme unter Einbeziehung von Schiffsankünften und erwartetem Ladebedarf. Unikai validierte diese Ergebnisse mit historischen Daten aus realen Schiffsvorplanungen.

1.7 AP 800 Implementierung der regelbasierten Platzplanung und Stellplatzverwaltung

Die im AP600 und AP700 konzeptionell entwickelten Verfahren bildeten die Grundlage für AP800, in dem die regelbasierte Platzplanung und Stellplatzverwaltung in eine prototypische Softwarelösung überführt wurde. Für Unikai stellte dieses Arbeitspaket einen der zentralen Schritte dar, da hier erstmals die abstrakten Regelwerke mit den operativen Anforderungen und den realen Terminalbedingungen zusammengeführt wurden.

Der Schwerpunkt von AP800 lag auf der technischen Umsetzung der zuvor definierten Datenmodelle, Entscheidungsbäume und Vergaberegeln in eine funktionale Anwendung, die die operative Realität eines Multipurpose-Terminals abbilden kann. Dabei musste eine Vielzahl von Restriktionen berücksichtigt werden, die sich aus unterschiedlichen Güterkategorien, Flächenrestriktionen, sicherheitsrelevanten Vorgaben und operativen Zwängen ergeben.

AP810 – Visualisierung von Gütern und Flächen

Innerhalb von AP810 wurden Visualisierungswerkzeuge entwickelt, die es ermöglichen, Container, Fahrzeuge, Trailer und Projektladung in abstrahierter Form digital auf dem Terminal abzubilden. Die Visualisierung basiert auf dem bestehenden System CHESSCON (YardView/CarView), wurde jedoch deutlich erweitert, um die spezifischen Anforderungen von Unikai abzudecken.

Unikai spielte in diesem Paket eine doppelte Rolle: Einerseits stellte das Terminal umfangreiche Geländedaten, historische Belegungsdaten und hochauflösende Layoutinformationen zur Verfügung; andererseits validierten die operativen Mitarbeitenden die visuelle Darstellung hinsichtlich ihrer Eignung für den anspruchsvollen RoRo- und High-&-Heavy-Umschlag.

In dieser Phase wurde deutlich, dass Projektladung — anders als standardisierte Container oder PKW — eine besondere Herausforderung darstellt, da ihre geometrische Vielfalt eine generische Darstellung erschwert. Die im Projekt entwickelte Lösung ermöglicht dennoch eine ausreichend präzise Visualisierung, um Stellplatz- und Flächenplanung realistischer und transparenter durchzuführen.

AP820 – Implementierung der Platzplanungskomponenten

AP820 konzentrierte sich auf jene Komponenten, die für die eigentliche Flächenplanung relevant sind. Dies umfasste insbesondere die Auswertung historischer Belegungsdaten, die Prognose zukünftiger Flächenbedarfe und die algorithmische Ableitung geeigneter Flächenzuordnungen für unterschiedliche Gütergruppen.

Unikai leistete hierbei einen wesentlichen Beitrag, indem operative Szenarien bereitgestellt wurden, darunter:

- Schiffsladungsrotationen und Ankunftsprofile
- saisonale Schwankungen im Fahrzeugumschlag
- Sonderprojekte mit Projektladung und Großgeräten
- Flächenverfügbarkeiten während Terminalumbauten

Die Software konnte daraufhin so gestaltet werden, dass sie Flächenprioritäten, Auslastungsgrade und Verschiebebedarfe automatisch ableitet. Eine wesentliche Herausforderung lag dabei in der Konsolidierung verschiedener Datenquellen (z. B. historische Yard-Daten, aktuelle TOS-Daten, Prognosedaten). Die Förderung ermöglichte hier die Entwicklung erster Prototypen, die eine automatisierte Flächenauswertung in 3D visualisieren und operative Engpässe frühzeitig identifizieren.

AP830 – Implementierung regelbasierter Stellplatzvergabe

In AP830 wurden die zuvor definierten Vergaberegeln in ein regelbasiertes Verfahren überführt, das Stellplatzvorschläge automatisiert berechnen kann. Diese Logik musste individuell an die verschiedenen Ladungsarten — insbesondere Container, PKW, LKW und Projektladung — angepasst werden.

Für Container konnte ein erster funktionsfähiger Vergabe-Algorithmus entwickelt werden, der automatisiert Vorschläge auf Basis von Flächenrestriktionen, Abmessungen, Eigentümeranforderungen, Abgangslogik und Handling-Präferenzen generiert. Bei Fahrzeugen

und Projektladung sind die Regeln komplexer, jedoch konnten auch hier erste konzeptionelle Umsetzungen getestet werden.

Unikai bewertete alle Vorschläge aus Sicht der operativen Praxis. Es zeigte sich, dass die regelbasierte Vergabe die Erfahrung der Mitarbeitenden nicht ersetzt, diese aber erheblich unterstützen kann — insbesondere durch konsistente Entscheidungslogik und Transparenz. Die im Projekt entstandenen Prototypen bilden damit eine wertvolle Grundlage für ein zukünftiges produktives System.

1.8 Ergebnisse AP 900: Evaluation und Validierung

AP900 stellte den abschließenden Validierungs- und Bewertungsabschnitt der entwickelten Systeme dar. Die Aufgabe bestand darin, die entwickelten Prototypen unter realen Bedingungen auf dem Unikai-Terminal zu testen, ihre Leistungsfähigkeit zu beurteilen und ihre Praxistauglichkeit zu bewerten.

1.8.1 Teilvalidierung der Vermessungsstation

Die vollständige Evaluation der Vermessungsstation war erst gegen Ende des Projekts möglich, da bauliche Verzögerungen und Herausforderungen bei der Kalibrierung die Inbetriebnahme verzögerten. Nachdem die Station umgebaut und neu kalibriert wurde, konnte Unikai realitätsnahe Testläufe mit verschiedenen Fahrzeugtypen durchführen. Dabei zeigte sich, dass der Prototyp grundlegend funktionstüchtig ist, jedoch bei bestimmten Fahrzeugklassen — insbesondere bei stark reflektierenden Oberflächen oder komplexen LKW-Aufbauten — noch manuelle Korrekturen erforderlich sind.

Diese Erkenntnisse sind für Unikai von hoher Relevanz, da sie aufzeigen, welche Güter sich bereits automatisiert verarbeiten lassen und wo operative Sonderfälle einzugrenzen oder alternative Verfahren zu entwickeln sind.

1.8.2 Evaluation der Identifikations- und Lokalisierungsverfahren

Im Projekt konnten nur kleinere Drohnen, die nicht die volle, benötigte Leistungsfähigkeit hatten, eingesetzt werden. Regulatorische Rahmenbedingungen schränkten den Gebrauch größerer Drohnen ebenso wie die Kosten für automatisch betreibbare Drohnen ein. Da Drohnen in Deutschland im Terminalbetrieb nur in Sichtweite und unter strenger Gewichtsgrenze betrieben werden dürfen, konnten nicht alle geplanten Tests vollständig durchgeführt werden.

Trotzdem konnte Unikai bestätigen, dass:

- Datamatrixmarker in den meisten Fällen zuverlässig erkennbar sind,
- GPS-basierte Lokalisierung auf Stellplatzrasterebene ausreichend genau sein kann,
- RFID-basierte Verfahren nur in Teilbereichen (v. a. Mafi-Trailer) praktikabel sind.

Diese Ergebnisse sind zentral für zukünftige Umsetzungsstrategien im Terminalbetrieb.

1.8.3 Validierung der regelbasierten Platzplanung und Stellplatzverwaltung

Der Schwerpunkt der Validierung lag auf den Softwareprototypen aus AP600, AP700 und AP800. Diese Komponenten konnten unter realen operativen Bedingungen getestet werden und zeigten deutliche Potenziale:

- konsistentere Flächenplanung
- realistischere Abbildung von Flächenrestriktionen
- signifikante Reduktion manueller Abstimmung
- Verbesserung der Transparenz über verfügbare und belegte Flächen

Unikai bestätigte die Funktionsfähigkeit der Prototypen, insbesondere in Bezug auf Visualisierung, Regelanwendung und Vorschlagslogik.

1.8.4 Gesamtbewertung

Unikai bewertete AP900 als einen wichtigen Schritt hin zur Praxistauglichkeit. Auch wenn nicht alle Ziele vollständig erreicht werden konnten, liefert AP900 ebenso wie die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete klare Handlungsempfehlungen für Weiterentwicklungen und zeigt sowohl technische Grenzen als auch Potenziale für zukünftige Produktivsysteme auf.

1.9 AP 1000: Projektsteuerung, Koordination und Öffentlichkeitsarbeit

AP1000 war ein übergeordnetes organisatorisches Arbeitspaket, das die gesamte Projektlaufzeit begleitete. Als Verbundführer oblag Unikai die zentrale Verantwortung für:

- die administrative Projektsteuerung,
- die inhaltliche Koordination der Partner,
- das Fortschritts- und Berichtswesen,
- die Budgetüberwachung,
- die Organisation von Statusmeetings und Workshops,
- die Schnittstellenarbeit gegenüber dem Projektträger,
- und die begleitende Dokumentation.

Unikai stellte sicher, dass alle Arbeitspakete zeitlich und inhaltlich aufeinander abgestimmt waren. Dies war insbesondere wichtig, da Verzögerungen in technischen APs — wie bei der Vermessungsstation — erhebliche Auswirkungen auf Folgepakete hatten (z. B. AP400, AP900). Durch die kontinuierliche Koordination konnten Risiken frühzeitig identifiziert und in Abstimmung mit den Forschungspartnern kompensiert werden.

Auch in der Öffentlichkeitsarbeit spielte Unikai eine zentrale Rolle: Gemeinsam mit HITeC und akquinet wurden Ergebnisse auf Fachveranstaltungen, Messen und Innovationsforen präsentiert, u. a.:

- PIER-Konferenz 2023
- Home Coming Home Port 2023
- Hamburg Innovation Summit 2024
- UITP Mobility Summit 2025

Durch diese Maßnahmen wurde das Projekt sichtbar gemacht und der Wissenstransfer in die Hafenwirtschaft unterstützt.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Fördermittel wurden in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Personalaufwand, insbesondere zur Prozessaufnahme, Testdurchführung, Kalibrierungsbegleitung, operativen Betreuung der Messstation und Validierung der KI-Modelle.
- Infrastrukturaufbau, darunter Installation von Kamerahalterungen, elektrischer Versorgung, Netzwerkanbindung sowie bauliche Vorbereitungen der Testflächen.
- Hardwarebeschaffung, inklusive Sensorik, Kameras, Drohnen, Serverkomponenten und Entwicklungsgeräte.
- Technische Unterstützung, z. B. für ERP-Anpassungen, Schnittstellenentwicklung und Datenmanagement.

Alle Mittel wurden wirtschaftlich und gemäß den im Antrag beschriebenen Maßnahmen eingesetzt. Kostenabweichungen ergaben sich primär aus Lieferengpässen und notwendigen Standortverlagerungen der Vermessungsstation.

Insgesamt konnte das Budget mit geringen Abweichungen gut eingehalten werden. Es entstanden etwas höhere Personalkosten als geplant. Diese Differenz konnte jedoch durch etwas geringer sonstige unmittelbare Vorhabenkosten aufgefangen werden. Insgesamt kam es zu einer Budgetunterschreitung von 9%.

Den höchsten Anteil an den Kosten hatten, wie geplant, die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten gefolgt von den Personalkosten. Bei den sonstigen unmittelbaren Kosten bildeten die mit dem Aufbau der Vermessungsstation zusammenhängenden Positionen den größten Posten, gefolgt von den Kosten, die mit der Verwiegung zusammenhängen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Projekt AKIDU durchgeführten Arbeiten waren in ihrer Gesamtheit notwendig, um die wissenschaftlichen und technologischen Ziele des Verbundvorhabens zu erreichen und eine Grundlage für die Digitalisierung des Umschlags heterogener Güter im Hafen zu schaffen. Das Gesamtprojekt verfolgte das Ziel, zentrale Herausforderungen der RoRo- und High-&-Heavy-Logistik durch KI-basierte Verfahren, automatisierte Sensorik, regelbasierte Planungssysteme und digitale Identifikationsmethoden grundlegend zu adressieren. Diese Zielsetzung ist komplex, da sie sowohl wissenschaftliche Grundlagenarbeit als auch praktische Validierung in einem realen Terminalbetrieb erfordert. Ein solches Vorhaben kann nur im Zusammenspiel aller Partner realisiert werden, da Forschungseinrichtungen, Softwareunternehmen und Praxispartner jeweils komplementäre Rollen einnehmen, die für das Gelingen unabdingbar sind.

Aus wissenschaftlicher Sicht waren die Arbeiten notwendig, weil der Einsatz sensorgestützter Vermessung und KI-basierter Entscheidungslogik im Kontext eines vielschichtigen Multipurpose-Terminals bislang kaum erforscht ist. Sensorische Ansätze wie TOF-Kameras oder optische Identifikatoren mussten zunächst in Laborumgebungen entwickelt und anschließend schrittweise an reale Betriebsbedingungen angepasst werden. Ebenso erforderte die Entwicklung regelbasierter Stellplatzvergabeverfahren ein tiefes Verständnis der operativen Entscheidungsprozesse, da diese in der bisherigen Forschung weitgehend unbeachtet geblieben sind. Die wissenschaftlich-technische Arbeit der Partner HITeC und akquinet war daher notwendig, um die dafür erforderlichen Algorithmen, Datenmodelle und Softwareprototypen zu entwickeln, zu testen und zu evaluieren.

Gleichzeitig war der Beitrag von Unikai für das Gesamtprojekt elementar. Ohne die Bereitstellung realer Testfelder, die operative Expertise und die kontinuierliche Beteiligung der Mitarbeitenden wäre die Durchführung der Arbeiten nicht möglich gewesen. Die Validierung der Sensorik, die Erprobung der KI-Verfahren unter realen Umwelt- und Betriebsbedingungen sowie die Überprüfung der Stellplatzvorschläge und Flächenlogiken erfordern ein Multipurpose Terminal mit heterogenen Güterstrukturen und real ablaufenden Prozessen. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse — etwa zu Reflexionsproblemen bei Fahrzeugoberflächen, Einschränkungen der RFID-Technologie, der Abhängigkeit operativer Entscheidungen von Schiffsrotationen oder den dynamischen Interdependenzen zwischen Lagerflächen — wären ohne diese reale Einbettung nicht erzielbar gewesen.

Auch auf der Ebene der Projektsteuerung und der Gesamtkoordination war die Beteiligung aller Partner notwendig und angemessen. Die komplexe Abhängigkeit der Arbeitspakete voneinander verlangte eine präzise zeitliche Abstimmung: Fortschritte in der Vermessung wirkten sich unmittelbar auf die Datenhaltung aus, deren Ergebnisse wiederum Grundlage für die Stellplatzplanung und die spätere Evaluation waren. Das Projektmanagement musste Verzögerungen ausgleichen, technische Schwierigkeiten adressieren, die in Forschungsprojekten dieser Art unvermeidlich sind, und gleichzeitig sicherstellen, dass alle Partner effizient zusammenarbeiten. Diese Aufgaben waren für das Gelingen des Gesamtvorhabens entscheidend und wurden im Rahmen von AP1000 durch Unikai in enger Abstimmung mit HITeC und akquinet verantwortungsvoll durchgeführt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Notwendigkeit der Arbeiten nicht nur in den operativen Herausforderungen eines Multipurpose-Terminals begründet war, sondern auch in den übergeordneten Zielen des Projekts: der Erhöhung der Transparenz im Umschlagprozess, der Reduktion manueller Tätigkeiten, der Verbesserung der Datenqualität, der Erhöhung der Planungssicherheit und der Schaffung eines digitalen Fundaments für zukünftige Automatisierung. Die Angemessenheit ergibt sich sowohl aus dem Umfang der Aufgabenstellung als auch aus der wissenschaftlichen und technologischen Komplexität, die eine intensive, interdisziplinäre Zusammenarbeit im Verbund erforderte.

Damit waren die im Projekt durchgeführten Arbeiten — sowohl im Gesamtverbund als auch in den spezifischen Teilvorhaben der Unikai — in vollem Umfang notwendig, angemessen und zielgerichtet, um die Forschungsfragestellungen erfolgreich zu bearbeiten und praxistaugliche Ergebnisse zu erzielen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die im Projekt AKIDU erzielten Ergebnisse besitzen für Unikai und die Hafenwirtschaft insgesamt potenziell einen erheblichen operativen und strategischen Nutzen. Der erwartete Mehrwert erstreckt sich dabei sowohl auf kurzfristige Effizienzgewinne im laufenden Betrieb als auch auf langfristige strukturelle Verbesserungen, die den Standort Hamburg als innovativen RoRo- und Multipurpose-Hafen stärken können. Die Verwertbarkeit ergibt sich aus der Kombination von sensorbasierten Vermessungsverfahren, KI-gestützten Identifikations- und Klassifikations-methoden, datengetriebenen Entscheidungswerkzeugen und einer regelbasierten Stellplatzplanung, die in ihrer Gesamtheit eine grundlegende Modernisierung der Umschlagsprozesse ermöglichen.

Das Projekt hat die Basis für den zukünftigen Einsatz automatisierter Vermessungs- und Identifikationsmethoden geschaffen. Jedoch sind die Projektergebnisse noch nicht unmittelbar im Betrieb einsetzbar, sondern erfordern weitere Forschung, um zu belastbaren und stabilen, reproduzierbaren Ergebnissen zu führen. Auch für die digitale Identifikation und Verfolgung der Güter auf dem Terminal sind die Grundlagen gelegt worden. Es konnten auch Ansätze, die zu Projektbeginn vielversprechend schienen, für den betrieblichen Einsatz zunächst ausgeschlossen werden, da sie sich als nicht praxistauglich im Umfeld eines mulitpurpose Terminals erwiesen.

Ein wesentlicher Nutzen des Projekts liegt in der Schaffung eines datengetriebenen Fundamentes für die Flächen- und Stellplatzplanung. Die heutige, erfahrungsbasierte Praxis ist zwar bewährt, stößt jedoch insbesondere bei komplexen und fluktuierenden Güterstrukturen an Grenzen. Durch AKIDU wird es erstmals möglich, Flächenbedarfe algorithmisch zu prognostizieren, alternative Stellplatzvorschläge zu simulieren und die Auswirkungen unterschiedlicher Belegungsstrategien auf den Gesamtbetrieb quantitativ zu bewerten. Dieses kann zu erhöhter Flächeneffizienz, bessere Reaktionsfähigkeit auf Schwankungen der Anliefer- und Ausliefermengen, optimierte Schiffsplanung und höhere Robustheit gegenüber Störungen führen.

Mittel- bis langfristig können so voraussichtlich direkte und indirekte Kosteneinsparungen erreicht werden. Dieses kann durch die Reduktion manueller Vermessungs- und Güterlokalisationszeiten, Verringerung von Umfuhren, weniger Suchprozesse, bessere Einsatzplanung von Personal und niedrigere Fehlerraten erreicht werden.

Langfristig kann eine moderne Datenbasis zudem Grundlage für dynamische Tarifmodelle, automatisierte Dokumentationsprozesse und effizientere Kundenkommunikation werden.

In wissenschaftlicher Hinsicht schafft AKIDU erstmals belastbare Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit sensorbasierter Vermessungssysteme im RoRo-Umfeld mit heterogenen Fahrzeugen, einem Gebiet, das bisher nur unzureichend untersucht wurde. Die Ergebnisse zu Reflexionsmustern, Kalibrierungsparametern und Punktwolkenverarbeitung bieten eine Grundlage für weitere Forschungsvorhaben und Produktentwicklungen.

Die Erkenntnisse aus AP300 und AP900 zur Identifikation mittels Drohnen und optischer Marker leisten zudem einen Beitrag zur Weiterentwicklung zukunftsorientierter Lokalisierungsverfahren in nicht-standardisierten Logistikumgebungen. Auch die Erkenntnisse zu Regelwerken für Stellplatzvergabe bilden eine wertvolle wissenschaftliche Basis, die bisher nicht existierte.

Damit erhöht AKIDU nicht nur die technische Leistungsfähigkeit der beteiligten Partner, sondern stärkt auch die gesamte deutsche Hafenwirtschaft im internationalen Vergleich.

Die im Projekt entwickelten Komponenten sind modulartig aufgebaut und können unabhängig voneinander weiterentwickelt und in bestehende Systeme integriert werden. Dies erhöht die Verwertbarkeit deutlich:

- Die Vermessungsstation kann – nach weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sukzessive in den operativen Betrieb überführt werden.
- Die Erkenntnisse aus den Versuchen mit den Identifikationsmethoden (Datamatrix + Drohne) können punktuell eingesetzt und später erweitert werden.

- Die regelbasierte Stellplatzplanung bildet die Grundlage für ein operatives Planungswerkzeug, das Unikai und potenziell andere Terminals nutzen können.
- Erkenntnisse zu KI-basierter Schadenserkennung und Fahrzeugklassifikation können weiter vertieft werden.

Besonders wichtig ist die hohe Transferfähigkeit:

Viele der im Projekt entwickelten Methoden sind nicht auf Unikai beschränkt, sondern lassen sich auf andere RoRo-Terminals und Terminals mit heterogenen Gütern sowie perspektivisch auch Werkslogistiken übertragen. Damit besitzt AKIDU einen erheblichen Mehrwert sowohl für Unikai als auch für die Hafenwirtschaft insgesamt.

5 Fortschritte bei anderen Stellen

Unikai beobachtete während der Laufzeit relevante Fortschritte in angrenzenden Technologien:

- Verbesserte TOF-Sensoren (höhere Auflösung, geringere Kosten)
- neue KI-Modelle wie Segment Anything 2 oder CLIP
- Weiterentwicklungen in Drohnen-GPS-Systemen
- Fortschritte in der Schadenserkennung durch Deep Learning

Diese Entwicklungen flossen dynamisch in das Vorhaben ein und erhöhten die wissenschaftlich-technische Validität der Arbeiten.

Es ist jedoch nicht bekannt, das vergleichbare Verfahren bei anderen Multipurpose Terminals mit stark heterogener Güterstruktur eingesetzt werden.

6 Veröffentlichungen

Unikai veröffentlichte keine wissenschaftlichen Arbeiten, wird jedoch projektbezogene Erkenntnisse im Rahmen interner Veranstaltungen und behördlicher Abstimmungen kommunizieren. Der wissenschaftliche Partner HITeC bereitet wissenschaftliche Präsentationen und Fachvorträge vor, an denen Unikai beteiligt war.

Über den Projektabschluss wurde in verschiedenen Branchenrelevanten Medien berichtet. Hier sind zu nennen:

- DVZ Deutsche Verkehrs-Zeitung
- THB Deutsche Schifffahrtszeitung
- Verkehrsrundschau
- Port Technology International
- verkehr.co.at
- explortal-logistics.net
- portseurope.com

Sowie bei der HHLA

- hhla.de

- HHLA inside

7 Quantitative und Qualitative Effekte von AKIDU

Im Projektantrag wurden ambitionierte Ziele formuliert, unter anderem deutliche Einsparungen an Personalaufwand sowie eine messbare CO_2-Reduktion durch verringerte Umfuhren und Suchfahrten. Wie im gemeinsamen Schlussbericht dargelegt wird, sind diese Ziele während der Projektlaufzeit nicht vollständig erreicht worden. Es ist jedoch eine gute Grundlage geschaffen worden, auf der weiter geforscht und entwickelt werden kann. Die nachfolgende Darstellung fokussiert daher auf jene Effekte, die tatsächlich während des Projekts eingetreten sind bzw. belastbar beobachtet und dokumentiert werden konnten.

Wirkungen beim Projektpartner Unikai:

7.1 Organisatorische und prozessuale Effekte

Der größte konkret eingetretene Nutzen für Unikai liegt im Bereich Organisation, Prozessklarheit und Kompetenzaufbau:

- Durch AP100 wurde eine systematische, vollständige Prozessaufnahme der relevanten Vermessungs-, Identifikations- und Flächenprozesse durchgeführt. Diese Dokumentation wird inzwischen intern als Referenz für weitere Digitalisierungs- und IT-Projekte genutzt.
- Die Arbeit in den AP600/700 (konzeptionelle Platz- und Stellplatzplanung) und AP800 (Implementierung) hat zu einem klar strukturierten Datenmodell, einem ausformulierten Regelwerk und zu einer ersten praktikablen Softwarelösung geführt, die am Terminal im Rahmen von Tests eingesetzt wurde. Diese Prototypen haben die Art und Weise verändert, wie Unikai die eigene Flächennutzung analysiert und diskutiert (z. B. durch 3D-Visualisierungen und Belegungsübersichten).
- In AP400/410 und 420 wurde ein funktionierendes Konzept zur Verwaltung von Vermessungsdaten und KI-Modellen mit konkreter prototypischer Umsetzung geschaffen, inklusive der Einbindung in Unikai-Systeme. Auch wenn die operative Dauernutzung noch nicht etabliert ist, besteht nun eine erprobte Architektur für künftige Integrationsprojekte.

Insgesamt ist die Digitalisierungsfähigkeit von Unikai durch AKIDU gewachsen und es sidn strukturelle und methodische Vorbereitungen getroffen worden. Auch in Bezug auf den Umgang mit KI-basierten Verfahren wurden Erfahrungen gewonnen.

7.2 Technische und operative Effekte

Die technischen Prototypen haben während der Projektlaufzeit punktuell bereits messbare Effekte im Testbetrieb erzeugt, allerdings noch nicht in einer Größenordnung, die die ursprünglich geplanten quantitativen Einsparziele belegt:

Die Vermessungsstation (AP200) konnte im Projektverlauf in einer funktionsfähigen Form betrieben werden; PKW, LKW und Stückgut konnten mit hinreichender Genauigkeit vermessen werden. Gleichzeitig ist festzustellen, dass die Vermessung aufgrund von Hardwareverzögerungen und Kalibrierungsproblemen nur eingeschränkt genutzt werden konnte

und eine durchgängige Praxistauglichkeit noch nicht erreicht ist. Der reale operative Effekt besteht daher vor allem in Erfahrungswissen darüber, wo die Station gut funktioniert und wo nicht, und nicht in eingesparten Messzeiten.

Die regelbasierte Platz- und Stellplatzverwaltung konnte im Terminalkontext erfolgreich validiert werden; die Tests bestätigen die Funktionsfähigkeit der Prototypen und ihren Beitrag zur Effizienzsteigerung im Flächen- und Stellplatzmanagement. Im Projektzeitraum zeigte sich dieser Nutzen vor allem in Form von besserer Transparenz, Planungssimulationen und einem verbesserten Verständnis von Flächenrestriktionen, weniger als in messbaren Kennzahlen des Tagesgeschäfts.

Für die Identifikation und Lokalisierung von Gütern wurden prinzipiell funktionierende Verfahren (Marker + Drohne, Datamatrix, semantische Segmentierung) gezeigt. Die Tests waren aber durch Grenzen in den Einsatzmöglichkeiten von Drohnen und begrenzte Bilddaten eingeschränkt, sodass im Projektzeitraum noch kein flächendeckender operativer Nutzen realisiert werden konnte, wohl aber ein klares Bild der technischen Machbarkeit.

Insgesamt besteht der reale Nutzen für Unikai aktuell weniger in bereits dauerhaft reduzierten Kosten oder CO_2-Emissionen, sondern vor allem in einem deutlich erhöhten Digitalisierungs- und KI-Reifegrad, belastbaren Prototypen und einem klareren Bild darüber, wie die nächste Umsetzungsstufe aussehen muss.

7.3 Nutzen für die deutsche Hafenwirtschaft

Aus Sicht der deutschen Hafenwirtschaft liegt der konkrete eingetretene Effekt insbesondere in:

- der Verfügbarkeit detaillierter Konzepte und prototypischer Lösungen für einen bislang wenig digitalisierten Bereich (RoRo, High-&-Heavy),
- und der Dokumentation von Erfolgen und Grenzen sensorbasierter Vermessung, drohnenbasierter Identifikation und regelbasierter Stellplatzvergabe in einer realen Terminalumgebung.

Andere Häfen können die im Schlussbericht aufbereiteten Erkenntnisse zu Stärken und Schwächen von TOF-Sensoren, praktischen Grenzen des RFID-Einsatzes, Anforderungen an Flächendatenmodelle und Regelwerke, sowie zur Integration von KI-Modellen in bestehende IT-Landschaften direkt nutzen, ohne dieselben Fehler und Umwege wiederholen zu müssen.

Der tatsächliche, heutige Nutzen für die deutsche Hafenwirtschaft ist damit vor allem ein Wissens- und Konzeptgewinn, nicht bereits eine breitflächige Veränderung der Umschlagprozesse im Markt. Allerdings handelt es sich um einen Wissensgewinn, der aufgrund seiner Detailliertheit und Praxisnähe eine hohe Anschlussfähigkeit für weitere Vorhaben besitzt.

7.4 Nutzen für Umwelt und Allgemeinheit

Die im Antrag ursprünglich prognostizierten CO_2-Einsparungen (z. B. durch Reduktion von Umfuhren und Suchfahrten) wurden nicht vollständig erreicht, wie auch im gemeinsamen Schlussbericht dargelegt. Die entwickelten Lösungen haben den Status von ersten Prototypen und wurden im Projektzeitraum nur begrenzt in den Regelbetrieb überführt.

Der tatsächlich eingetretene Nutzen für Umwelt und Allgemeinheit während der Projektlaufzeit ist daher:

- direkt messbar: eher gering, da die Systeme noch nicht im flächendeckenden Dauerbetrieb eingesetzt werden;
- indirekt: relevant, weil durch die im Projekt geleistete Vorarbeit die Voraussetzungen geschaffen wurden, dass in einem Folgeprojekt oder in der Umsetzung in den Echtbetrieb tatsächlich Emissionen, Lärm und Energieverbrauch reduziert werden können.

Zugleich tragen die erarbeiteten grundlegenden Konzepte und Prototypen für weniger Such- und Rangierfahrten perspektivisch zu erhöhter Sicherheit sowie besserer Transparenz logistischer Prozesse bei.

7.5 Aufwand im Verhältnis zum Nutzen

Stellt man die Aufwendungen den tatsächlich erzielten Wirkungen gegenüber, ergibt sich folgendes Bild:

Die ursprünglich formulierten Effizienz- und Umwelteffekte wurden quantitativ noch nicht erreicht, was insbesondere auf Verzögerungen bei der Vermessungsstation und sehr eingeschränkten Ergebnissen beim Einsatz von Drohnen, RFID und sonstigen Markern zurückzuführen ist. Demgegenüber steht ein substanzieller Kompetenz-, Konzept- und Prototypgewinn:

- Unikai verfügt heute über klar dokumentierte Prozesse, Regelwerke und Datenmodelle.
- Es liegen funktionierende Prototypen der Platz- und Stellplatzplanung vor, die auf dem Terminal getestet wurden

Es wurden übertragbare Erkenntnisse geschaffen, wie KI-basierte Systeme im RoRo- und High-&-Heavy-Kontext funktionieren können – und wo sie an Grenzen stoßen.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass der direkt operative Nutzen zum Projektende noch begrenzt ist, weil wesentliche Komponenten prototypisch bleiben. Der „weiche“, aber strategisch sehr relevante Nutzen in Form von Wissen, Konzepten, Strukturen und getesteten Prototypen ist dagegen hoch und bildet die notwendige Grundlage dafür, dass die ursprünglich angestrebten Effekte (Zeit-, Kosten- und Emissionsreduktionen) in einem nächsten Schritt tatsächlich realisiert werden können.